



Nádia Rute Vaz Gonçalves

Licenciada em Engenharia do Ambiente

Arejamento Colateral de Águas Residuais em Sistemas de Elevação por Parafusos de Arquimedes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Perfil de Engenharia Sanitária

Orientador: David José Fonseca Pereira,
Prof. Doutor, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António Pedro de Nobre Carmona Rodrigues
Arguente: Eng.º Pedro Ricardo Neto Póvoa
Vogal: Prof. Doutor David José Fonseca Pereira



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2015

Arejamento Colateral de Águas Residuais em Sistemas de Elevação por Parafusos de Arquimedes

Copyright © Nádia Rute Vaz Gonçalves, FCT/UNL e UNL, 2015

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Ao meu Pai com eterna saudade.

AGRADECIMENTOS

A concretização da presente dissertação, contou com o apoio direto e indireto de diversas pessoas.

Começo por agradecer ao Professor Doutor David José Fonseca Pereira, meu orientador, pela sugestão do tema, disponibilidade imediata, cooperação, conhecimentos transmitidos e pelas suas preciosas críticas e orientações.

À SIMTEJO - Saneamento Integrado dos Municípios do Tejo e Trancão, S. A., pela informação cedida e em particular: ao Eng.^o Pedro Póvoa pelos meios disponibilizados para a realização dos ensaios; ao Eng.^o Pedro Álvaro por ter disponibilizado o acesso à ETAR de Alcântara e pela informação relevante fornecida; ao Eng.^o Paulo Inocêncio por ter disponibilizado o acesso às ETAR de Frielas e Bucelas, e pela informação disponibilizada; à Eng.^a Vanda Barroso pela sua disponibilidade; ao Eng.^o Nuno Pimentel pela sua disponibilidade e acompanhamento às instalações.

Um agradecimento muito especial ao meu pai e à minha mãe, por todo o carinho, por me terem acompanhado ao longo do meu percurso académico e por sempre me incentivarem a atingir todos os meus objetivos.

Ao meu irmão pela paciência, motivação, disponibilidade e carinho.

À restante família pelo apoio dado ao longo da minha vida.

E por fim, a todos os meus amigos, em especial à Sara que sempre me encorajou e motivou nesta fase tão crucial da minha vida.

RESUMO

O parafuso de Arquimedes, tem como principal função bombear grandes volumes de massas fluídas, nomeadamente águas residuais, quando os desníveis a vencer não são muito elevados. A presente dissertação, tem como objetivo apresentar um estudo exploratório relacionado com este equipamento: desenvolvimento de uma ferramenta analítica (modelo em forma de função matemática) que permita estimar o valor do arejamento associado à elevação de águas residuais, bem como interpretar de uma forma qualitativa a relação entre esse valor e as variáveis de que depende.

O estudo foi elaborado tendo, como base teórica, o conhecimento do estado da arte da investigação anterior disponível, relativamente ao fenómeno de transferência de massa gás-liquido. Porém, genericamente, atendendo às imperfeições de muitos modelos teóricos, quando comparados com os resultados práticos, e dado não existirem, ainda, modelos conhecidos sobre as especificidades do caso em estudo, foi objetivo da dissertação utilizar medições *in situ* em três ETAR (Estação de Tratamento de Águas Residuais), localizadas na área metropolitana de Lisboa, para obter resultados práticos imediatos.

Depois de recolhidos os dados de campo, procedeu-se à realização de testes estatísticos, conducentes à obtenção de uma equação de previsão do arejamento fornecido, em função das variáveis independentes que caracterizam a instalação de elevação, podendo, assim, ser a mesma utilizada para estimativas aproximadas em conceção de um sistema de elevação do tipo em estudo. A análise de sensibilidade ajudou a criar massa crítica sobre a forma como os resultados podem ser influenciados pela variação das variáveis independentes.

Na fase final desta dissertação, após a análise de resultados e a obtenção da função da estimativa do arejamento, apresentam-se as conclusões explicativas finais, bem como as sugestões consideradas pertinentes acerca de investigações futuras que poderão pormenorizar o estudo agora apresentado, particularmente relativamente a um maior número de dados de tipologias mais diferenciadas.

Palavras-chave: transferência de oxigénio, oxigénio dissolvido, rearejamento, elevação de águas residuais, parafuso de Arquimedes

ABSTRACT

The Archimedes' screws have the main function to pump large volumes of fluid masses, especially wastewater, when the gaps winning aren't very high. This thesis, aims to present an exploratory study related to this equipment: development of an analytical tool (model as a mathematical function) that allows estimating the airing of the value associated with increased wastewater and interpret in a qualitative way the relationship between this value and the variables that depends.

The study was prepared, with the theoretical basis of knowledge, obtained from state of the art available before research, the gas-liquid mass transfer phenomenon. However, given the imperfections of theoretical models, generally existing in science, compared to practical results, to build trust and sustain this dissertation, *in situ* measurements were used in three WWTP (Wastewater Treatment Plant), located in the Lisbon metropolitan area, for immediate practical results.

After collected data proceeded to the statistical tests leading to obtaining an aeration forecast equation, according to the independent variables that characterize the installation of the elevation, and may thus be the same used to approximate estimates in design a lifting of the type under consideration. Sensitivity analysis helped to create critical mass as to how the results can be influenced by variation of the independent variables.

In the final stage of this dissertation, after the analysis of results and obtain the aeration estimate of function, are presented the final explanatory conclusions and suggestions considered relevant about future investigations that may detail the study now presented, particularly in relation to a higher number of more different data types.

Keywords: oxygen transfer, dissolved oxygen, reaeration, wastewater pumping, Archimedes screw

ÍNDICE DE MATÉRIAS

Agradecimentos.....	vii
Resumo	ix
Abstract	xi
Índice de Matérias	xiii
Índice de Figuras	xvii
Índice de Tabelas	xxi
Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos.....	xxv
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos e introdução metodológica	2
1.3 Estrutura interna da dissertação	3
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1 Princípios da transferência de oxigénio	5
2.2 Teorias da transferência de massa	6
2.3 Processo de transferência de massa: Rearejamento	11
2.4 Fatores que afetam a concentração de saturação de OD	14
3. Parafusos de Arquimedes e a sua utilização	17
3.1 História: Origem do parafuso de Arquimedes	17
3.2 Caracterização do parafuso de Arquimedes.....	18
3.2.1 Principais componentes	19
3.2.2 Mecanismo do movimento.....	20
3.2.3 Nomenclatura	21
3.3 Vantagens e desvantagens do parafuso de Arquimedes	22

3.4 Aplicabilidade do parafuso de Arquimedes.....	23
3.5 Elevação inicial por parafusos de Arquimedes nas ETAR em Portugal	25
4. Metodologia	29
4.1 Modelo conceptual	29
4.2 Campanhas experimentais.....	29
4.2.1 Instrumentos de medição de parâmetros de qualidade	30
4.2.2 Instrumentos de medição de caudal	31
4.2.3 Descrição dos ensaios	32
4.2.4 Plano de amostragem	33
4.2.5 Condicionantes dos ensaios.....	33
4.3 Tratamento de dados	34
5. Casos de Estudo	37
5.1 Nota introdutória.....	37
5.2 Caso de estudo nº 1 - ETAR de Alcântara.....	37
5.2.1 Descrição geral.....	37
5.2.2 Processo de tratamento	37
5.2.3 Caracterização do local de amostragem	38
5.2.4 Aspetos das campanhas de ensaios experimentais	39
5.3 Caso de estudo Nº 2 - ETAR de Bucelas	40
5.3.1 Descrição Geral.....	40
5.3.2 Processo de tratamento	40
5.3.3 Caracterização do local de amostragem	41
5.3.4 Aspetos das campanhas de ensaios experimentais	42
5.4 Caso de estudo nº 3 - ETAR de Frielas	43
5.4.1 Descrição geral.....	43
5.4.2 Processo de tratamento	43
5.4.3 Caracterização do local de amostragem	44
5.4.4 Aspetos das campanhas de ensaios experimentais	46
5.5 Resumo dos factores dos casos de estudo	47

6. Exploração de Resultados.....	49
6.1 Nota introdutória.....	49
6.2 Análise individual dos dados.....	49
6.3 Construção da função.....	61
6.3.1 Validação dos modelos.....	72
7. Conclusões e Recomendações.....	75
7.1 Conclusões finais.....	75
7.2 Limitações gerais do estudo.....	77
7.3 Perspetivas futuras.....	78
Referências Bibliográficas.....	79
Anexo I - Campanhas de medição de parâmetros.....	83
Plano de amostragem.....	83
Exemplo de ficha de preparação de campanha experimental.....	84
Exemplo de folha de registo de ensaio.....	84
Anexo II - Características técnicas dos parafusos de Arquimedes dos casos de estudo.....	87
Anexo III - Resultados experimentais.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Resistências envolvidas no transporte do oxigénio do seio gasoso para o interior da célula (Adaptado de Bailey e Ollis, 1986).	6
Figura 2 – Esquema simplificado da definição da teoria dos dois filmes, considerando a transferência de oxigénio.	7
Figura 3 – Gradientes de concentração nas vizinhanças da interface gás-líquido existentes na transferência de massa de uma bolha de gás para o líquido (Adaptado de Chisti, 1989).	8
Figura 4 - Parafuso de Arquimedes (Fonte: Rorres, 2000).	17
Figura 5 - Parafusos de Arquimedes a céu aberto, na ETAR de Serzedo (Fonte: Felmag, 2015).	18
Figura 6 - Parafusos de Arquimedes com cobertura, na ETAR de Paço de Sousa (Fonte: Penafiel TV, 2015).	18
Figura 7 - Parafuso de Arquimedes (Adaptado de Spellman e Drinan, 2001).	19
Figura 8 - Parâmetros da geometria do parafuso de Arquimedes (fonte: Catálogo da Landustrie, 2012).	21
Figura 9 - Esquema do modelo conceptual.	29
Figura 10 - Medidor HQ30d da Hach.	31
Figura 11 - Sonda de OD.	31
Figura 12 - Pontos de amostragem (adaptado de Lakeside Equipment Corporation, 2004).	32
Figura 13 - Vista geral dos parafusos de Arquimedes, sem a cobertura, da ETAR de Alcântara (Fonte: SIMTEJO - ETAR de Alcântara, Junho de 2015).	38
Figura 14 - Vista geral dos parafusos de Arquimedes, com cobertura, da ETAR de Alcântara.	39
Figura 15 - Caixa de visita localizada a montante dos parafusos de Arquimedes, na ETAR de Alcântara.	39

Figura 16 - Caixa de visita localizada a jusante dos parafusos de Arquimedes, na ETAR de Alcântara.	39
Figura 17 - Vista geral dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas.	41
Figura 18 - Montante dos parafusos de Arquimedes, na ETAR de Bucelas.	42
Figura 19 - Jusante dos parafusos de Arquimedes, na ETAR de Bucelas.	42
Figura 20 - Vista geral do 2º estágio de elevação inicial da ETAR de Frielas.	45
Figura 21 - Esquema da elevação inicial da ETAR de Frielas (Fonte: SIMTEJO - ETAR de Frielas, Junho de 2015).	45
Figura 22 - Caixa de visita localizada a montante do 2º estágio de parafusos de Arquimedes da elevação inicial, na ETAR de Frielas.	46
Figura 23 - Jusante dos parafusos de Arquimedes da elevação inicial, na ETAR de Frielas.	46
Figura 24 - Ponto próximo da entrada do efluente da EE3, na ETAR de Frielas.	47
Figura 25 - Ponto afastado da entrada do efluente da EE3, na ETAR de Frielas.	47
Figura 26 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Alcântara (17/04/2015).	51
Figura 27 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Alcântara (17/04/2015).	51
Figura 28 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Alcântara (1º ensaio de 11/09/2015).	52
Figura 29 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Alcântara (1º ensaio de 11/09/2015).	52
Figura 30 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Alcântara (2º ensaio de 11/09/2015).	52
Figura 31 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Alcântara (2º ensaio de 11/09/2015).	52
Figura 32 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (1º ensaio de 02/07/2015).	54

Figura 33 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (1º ensaio de 02/07/2015).	54
Figura 34 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (2º ensaio de 02/07/2015).	54
Figura 35 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (2º ensaio de 02/07/2015).	54
Figura 36 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (3º ensaio de 02/07/2015).	55
Figura 37 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (3º ensaio de 02/07/2015).	55
Figura 38 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (1º ensaio de 19/08/2015).	56
Figura 39 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (1º ensaio de 19/08/2015).	56
Figura 40 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (2º ensaio de 19/08/2015).	56
Figura 41 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (2º ensaio de 19/08/2015).	56
Figura 42 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante do 2º estágio de elavação inicial, na ETAR de Frielas (1º ensaio de 02/07/2015).	58
Figura 43 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante do 2º estágio de elevação inicial, na ETAR de Frielas (1º ensaio de 02/07/2015).	58
Figura 44 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante do 2º estágio de elevação inicial, na ETAR de Frielas (2º ensaio de 02/07/2015).	58

Figura 45 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante do 2º estágio de elevação inicial, na ETAR de Frielas (2º ensaio de 02/07/2015).	58
Figura 46 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante do 2º estágio de elevação inicial, na ETAR de Frielas (3º ensaio de 02/07/2015).	59
Figura 47 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante do 2º estágio de elevação inicial, na ETAR de Frielas (3º ensaio de 02/07/2015).	59
Figura 48 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante do 2º estágio da elevação inicial, na ETAR de Frielas (1º ensaio de 19/08/2015).	60
Figura 49 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante do 2º estágio da elevação inicial, na ETAR de Frielas (1º ensaio de 19/08/2015).	60
Figura 50 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante do 2º estágio da elevação inicial, na ETAR de Frielas (1º ensaio de 19/08/2015).	60
Figura 51 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante do 2º estágio da elevação inicial, na ETAR de Frielas (2º ensaio de 19/08/2015).	60
Figura 52 - Valores de OD_j resultantes do modelo da regressão linear e por medição.	72
Figura 53 - Valores de OD_j resultantes do modelo da regressão não linear (função exponencial) e por medição.	72

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Listagem de ETAR com elevação inicial por ação de parafusos de Arquimedes em Portugal Continental.	26
Tabela 2 - Resumo dos sistemas de elevação inicial de água residual dos casos de estudo.	47
Tabela 3 - Valores obtidos de OD_m , OD_j e E20, na 1ª campanha experimental.	49
Tabela 4 - Valores obtidos de OD_m , OD_j e E20, na 2ª campanha experimental.	50
Tabela 5 - Testes sobre os coeficientes da regressão linear, utilizando os dados de ambas campanhas experimentais.	62
Tabela 6 - Sumário do modelo da regressão linear para estimativa do nível de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes, com os dados de ambas as campanhas experimentais.	63
Tabela 7 - ANOVA da regressão linear, com os dados de ambas as campanhas experimentais.	63
Tabela 8 - Testes sobre os coeficientes da regressão linear, utilizando os dados da 1ª campanha experimental.	64
Tabela 9 - Sumário do modelo da regressão linear para estimativa do nível de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes, com os dados da 1ª campanha experimental.	64
Tabela 10 - ANOVA da regressão linear, com os dados da 1ª campanha experimental.	65
Tabela 11 - Testes sobre os coeficientes da regressão linear, utilizando os dados da 2ª campanha experimental.	65
Tabela 12 - Sumário do modelo da regressão linear para estimativa do nível de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes, com os dados da 2ª campanha experimental.	66
Tabela 13 - ANOVA da regressão linear, com os dados da 2ª campanha experimental.	66
Tabela 14 - Testes sobre os coeficientes da regressão linearizada, utilizando os dados de ambas campanhas experimentais.	67

Tabela 15 - Sumário do modelo da regressão linearizada para estimativa do logaritmo do nível de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes, com os dados de ambas as campanhas experimentais.	68
Tabela 16 - ANOVA da regressão linearizada, com os dados de ambas as campanhas experimentais.	68
Tabela 17 - Testes sobre os coeficientes da regressão linearizada, utilizando os dados da 1ª campanha experimental.	69
Tabela 18 - Sumário do modelo da regressão linearizada para estimativa do logaritmo do nível de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes, com os dados da 1ª campanha experimental.	69
Tabela 19 - ANOVA da regressão linearizada, com os dados da 1ª campanha experimental.	70
Tabela 20 - Testes sobre os coeficientes da regressão linearizada, utilizando os dados da 2ª campanha experimental.	70
Tabela 21 - Sumário do modelo da regressão linearizada para estimativa do logaritmo do nível de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes, com os dados da 2ª campanha experimental.	71
Tabela 22 - ANOVA da regressão linearizada, com os dados da 2ª campanha experimental.	71
Tabela 23 - Valores médios da concentração de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes e da eficiência de rearejamento, à temperatura de 20°C.	76
Tabela 24 - Plano das campanhas de ensaios experimentais.	83
Tabela 25 - Características técnicas dos parafusos de Arquimedes instalados em elevação inicial das ETAR de Alcântara, Frielas e Bucelas.	87
Tabela 26 - Resultados experimentais de OD referentes aos parafusos de Arquimedes da elevação inicial da ETAR de Alcântara (17 de Abril).	89
Tabela 27 - Resultados experimentais de OD referentes aos parafusos de Arquimedes do 2º estágio de elevação inicial da ETAR de Frielas (02 de Julho).	90
Tabela 28 - Resultados experimentais de OD referentes aos parafusos de Arquimedes da elevação inicial da ETAR de Bucelas (02 de Julho).	92
Tabela 29 - Resultados experimentais de OD referentes aos parafusos de Arquimedes do 2º estágio de elevação inicial da ETAR de Frielas (19 de Agosto).	94
Tabela 30 - Resultados experimentais de OD referentes aos parafusos de Arquimedes da elevação inicial da ETAR de Bucelas (19 de Agosto).	97

Tabela 31 - Resultados experimentais de OD referentes aos parafusos de Arquimedes da elevação inicial da ETAR de Alcântara (11 de Setembro).	99
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Siglas e Abreviaturas

ALVT	Águas de Lisboa e Vale do Tejo, S.A.
AdP	Águas de Portugal
AGERE	Empresa de Águas, Efluentes e Resíduos de Braga, E.M.
AMTSM	Associação de Municípios das Terras de Santa Maria
ANOVA	Análise de variância
AUSTRA	Associação de Utilizadores do Sistema de Tratamento de Águas Residuais de Alcanena, Lda.
CBO	Carência Bioquímica de Oxigénio
CQO	Carência Química de Oxigénio
EE3	Estação Elevatória 3 (da ETAR de Frielas)
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
H ₂ S	Ácido Sulfídrico
Hg	Mercúrio
LDO	Oxigénio Dissolvido Luminescente (<i>Luminescent Dissolved Oxygen</i>)
OD	Oxigénio Dissolvido
OTR	Taxa de Transferência de Oxigénio (<i>Oxygen Transfer Rate</i>)

SIMDOURO Saneamento do Grande Porto, S.A.

SIMTEJO Saneamento Integrado dos Municípios do Tejo e Trancão, S.A.

SMAS Serviços Municipalizados de Água e Saneamento

SMEAS Serviços Municipalizados de Electricidade, Água e Saneamento

SST Sólidos Suspensos Totais

UV Radiação Ultravioleta

Símbolos

α Nível de significância fixo

β Ângulo da instalação do eixo do parafuso em relação à horizontal

β_i Coeficiente da regressão

ΔC Variação da concentração

Δx Espessura do filme

δ_G Espessura do filme gasoso

δ_L Espessura do filme líquido

θ Tempo de exposição do líquido ao gás

A Área interfacial total gás-líquido

a Área interfacial gás-líquido por unidade de volume

C^*_{760} Concentração de saturação de OD para a pressão atmosférica a 760 mm de Hg

C^*_L Concentração de oxigénio na fase líquida em equilíbrio com a fase gasosa

C_G Concentração de oxigénio no meio gasoso

C_{Gi}	Concentração de oxigénio da fase gasosa na interface
C_L	Concentração de oxigénio na fase líquida
C_{Li}	Concentração de oxigénio da fase líquida na interface
C_{sd}	Concentração de sólidos dissolvidos
D	Diâmetro nominal do parafuso de Arquimedes (o do volume de revolução exterior)
D_{O_2}	Coeficiente de difusão molecular do oxigénio no filme
D_v	Diâmetro do veio do parafuso de Arquimedes
dC/dt	Taxa de transferência de oxigénio do ar atmosférico para o líquido
E	Eficiência de rearejamento
E_{20}	Eficiência de rearejamento à temperatura padrão de 20°C
F	F-estatístico (<i>F-statistics</i>)
F_i	Força de origem mecânica
FP	Nível máximo de enchimento
F_t	Fator de correção da temperatura
H	Constante da lei de Henry
H_0	Altura de elevação hidráulica SP - TP
H_1	Altura de elevação hidráulica SP-FP
H_2	Altura de elevação hidráulica StP -FP
J	Número de voltas do parafuso de Arquimedes
J_{O_2}	Fluxo de massa do oxigénio
K	Coeficiente global de transferência de massa
k_G	Coeficiente de transferência de massa no filme gasoso

k_L	Coeficiente de transferência de massa no filme líquido
$k_L a$	Coeficiente volumétrico de transferência de oxigénio
L	Comprimento do parafuso de Arquimedes
N	Velocidade do parafuso de Arquimedes
OD_j	Concentração de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes
OD_m	Concentração de OD a montante dos parafusos de Arquimedes
P	Pressão atmosférica
P_G	Pressão parcial de oxigénio no seio da fase gasosa, em equilíbrio hipotético com a concentração de OD na fase líquida
P_{Gi}	Pressão parcial de oxigénio na interface, no lado do filme de gás, em equilíbrio com a concentração de soluto na interface gás-líquido
p	Valor de significância obtido a partir da amostra
Q	Caudal
R	Coeficiente de correlação
R_G	Resistência à transferência de massa no filme gasoso
R_L	Resistência à transferência de massa no filme líquido
R_T	Resistência total à transferência de massa
R^2	Quadrado do coeficiente de correlação
r_{OD}	Deficit de OD
r_s	Taxa de renovação superficial
S	Passo do parafuso de Arquimedes
SP	Ponto de descarga
StP	Nível máximo de líquido bombeado

S_x	Erro-padrão
T	Temperatura
T_m	Temperatura da água residual, medida a montante dos parafusos de Arquimedes
t	t-estatístico (<i>Student's t</i>)
TP	Nível mínimo de líquido a montante do parafuso de Arquimedes
V	Volume

1. INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

O Oxigénio Dissolvido (OD) na água é um parâmetro de extrema importância, dado que é um indicador da qualidade da água natural para a vida aquática, e interfere nos fenómenos químico-bacteriológicos que controlam a qualidade da água de utilização humana e da água residual.

A remoção de cargas poluentes nas ETAR é efetuada de forma a evitar riscos para a saúde pública e preservar a qualidade do meio hídrico ou o solo, no qual o efluente tratado, no final, é descarregado. A redução de substâncias poluidoras é, em grande parte, conseguida à custa de processos consumidoras de OD, tais como a matéria orgânica e os nutrientes, responsáveis pelo fenómeno de eutrofização.

Em tratamento aeróbio de efluentes, a presença de elevados teores de oxigénio na água residual é importante. As condições de aerobiose são essenciais para a respiração e crescimento dos microrganismos, responsáveis por metabolizar e consumir os principais contaminantes de água residual. Além de permitir reduzir a carga de orgânica, a aerobiose facilita outros processos, como a remoção de óleos e gorduras e previne a formação de odores tóxicos e desagradáveis ao olfato, incluindo o ácido sulfídrico (H_2S). Pela mesma última razão, em coletores de águas residuais também é crucial manter o estado de aerobiose, evitando a formação do gás H_2S . Este gás tem sido a origem da ocorrência de acidentes mortais em sistemas de drenagem e estações de tratamento de águas residuais.

Como os microrganismos aeróbios utilizam o oxigénio para degradar a matéria orgânica, ele é o reagente limitante, por vezes o único. Como o consumo de oxigénio é rápido a sua substituição tem de ser realizada através de arejamento, antes de se correr o risco de atingir as condições de anaerobiose e, conseqüente, a mortalidade dos microrganismos existentes. Os principais sistemas de arejamento artificial nas ETAR são os sistemas por insuflação de ar difuso na massa dos reatores e os sistemas mecânicos de agitação. O arejamento natural pode ser utilizado, consistindo no contacto da água com o ar atmosférico através grandes superfícies de interface ou na utilização de estruturas hidráulicas gravíticas, que utilizam a energia disponível para originar turbulência, provocando o rearejamento.

O arejamento no processo de tratamento de águas residuais, é crucial no tratamento secundário ou biológico, para permitir o desenvolvimento dos microrganismos aeróbios e facultativos que degradam a matéria orgânica. Também pode ser aplicado no tratamento preliminar (ou pré-tratamento) nas etapas de homogeneização e regularização, pré-arejamento ou desarenação/desengorduramento, nos procedimentos de remoção de óleos e gorduras por flotação e sistemas de bombagem por *air-lift*.

Nos rios e canais, já foram utilizados parafusos de Arquimedes e quedas (cascatas) de arejamento para melhoria da qualidade da água, através do aumento a concentração de OD, como é exemplo um rio em Chicago (Butts et al., 1999). A água é desviada, elevada, arejada e devolvida à sua linha natural de escoamento.

O parafuso de Arquimedes tem como função a elevação do nível de água através do movimento rotativo, sendo aplicado quando as alturas de elevação não são elevadas e os caudais são significativos. A sua aplicação no rearejamento, acabada de exemplificar, julga-se interessante, também, para a engenharia sanitária, quer na elevação de águas residuais de interceptores e emissários aprofundados com risco de atingirem condições de anaerobiose, quer em sistemas de elevação de estações de tratamento de águas residuais. Este é um efeito colateral que poderá ser contabilizado em certas condições. Exemplos serão nas ETAR, as estações de recirculação de efluentes de sistemas de filme fixo ou de lamas secundárias nos sistemas de mistura completa.

Na presente dissertação, apresenta-se a análise das consequências do movimento de rotação do parafuso de Arquimedes no aumento da concentração do oxigénio dissolvido nas águas residuais, quando instalado em elevação inicial de ETAR, partindo da explicação do conhecimento atual do processo de transferência de massa gasosa (oxigénio) para a massa líquida (esgoto).

1.2 OBJETIVOS E INTRODUÇÃO METODOLÓGICA

O principal objetivo da presente dissertação consiste em desenvolver uma função para quantificar o rearejamento da água residual, ou seja, o aumento da concentração em oxigénio dissolvido, criado pelo movimento de rotação dos parafusos de Arquimedes instalados nas ETAR, particularmente na elevação inicial de águas residuais brutas.

A metodologia adotada consistiu em (i) análise teórica do processo para escolha de variáveis relevantes, (ii) implementação de um plano de amostragem em cenário real, (iii) tratamento estatístico e (iv) análise e modelação matemática do comportamento do aumento da concentração de oxigénio dissolvido na água residual nas condições do estudo.

Os vários parâmetros relevantes medidos, escolhidos após uma análise teórica das interdependências prováveis, foram: (i) e (ii) concentrações de OD a montante e a jusante do parafuso de Arquimedes, (iii) caudal registado no equipamento de medição de caudal da ETAR, (iv) temperatura da água residual e (v) data/hora de medição dos parâmetros anteriores. Outros dados necessários à modelação são estáticos, isto é, foram definidos a partir da caracterização geométrica dos parafusos de Arquimedes em análise, fixa em cada instalação: o(s) diâmetro(s), o comprimento, o desnível e a inclinação. Como existe uma relação biunívoca entre qualquer uma e as restantes duas variáveis das três anteriores, para uma definição adequada bastam duas das três referidas variáveis. Existe, também, uma relação entre a temperatura do líquido e do meio ambiente, a menos que

existam interferências menos comuns, pelo que não se tornou relevante medir os dois tipos de temperatura.

Sendo fundamental a utilização de dados reais dos parâmetros mencionados anteriormente, foi necessário obter autorizações de entidades gestoras deste tipo de sistemas, tendo-se conseguido o apoio da SIMTEJO - Saneamento Integrado dos Municípios do Tejo e Trancão, S. A. que atualmente integra a nova empresa ALVT - Águas de Lisboa e Vale do Tejo, S.A., pertencente ao grupo AdP - Águas de Portugal. A SIMTEJO disponibilizou o equipamento de medição, o acesso a três ETAR munidas de parafusos de Arquimedes em elevação inicial (ETAR de Alcântara, Bucelas e Frielas) e o seu acompanhamento.

1.3 ESTRUTURA INTERNA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está organizada em 7 capítulos que são caracterizados da seguinte forma, além desta introdução de enquadramento:

Capítulo 2 - **Revisão Bibliográfica:** Apresenta os fundamentos teóricos essenciais ao estudo da capacidade de arejamento de águas residuais associado ao funcionamento de sistemas de elevação por parafusos de Arquimedes. Este capítulo explica, com base em pesquisa bibliográfica, o fenómeno de transferência de massa em sistema gás-líquido e o processo de rearejamento criado por estruturas hidráulicas.

Capítulo 3 - **Parafusos de Arquimedes e a sua aplicação:** É dedicado à apresentação do parafuso de Arquimedes, portanto, o objeto de estudo da presente dissertação. O capítulo 3 descreve os elementos constituintes do parafuso em causa, assim como apresenta o princípio de funcionamento e as características geométricas deste equipamento hidráulico de elevação. Este capítulo, além da aplicabilidade do parafuso de Arquimedes na área do saneamento de águas residuais; apresenta ETAR existentes em Portugal, com elevação inicial de águas residuais por ação de parafusos de Arquimedes.

Capítulo 4 - **Metodologia:** Integra a descrição dos procedimentos e metodologia adotados na parte experimental da dissertação, dividindo-se em duas partes: a primeira dedica-se à descrição dos procedimentos da recolha de informação, importante para obtenção de dados fidedignos; a segunda, apresenta o método estatístico utilizado para obtenção de funções.

Capítulo 5 - **Casos de Estudo:** Descreve os casos de estudo que suportaram o trabalho, caracteriza o local de amostragem e identifica as limitações dos ensaios experimentais, em cada caso.

Capítulo 6- **Exploração de Resultados:** Consiste na análise e discussão de resultados obtidos, através da representação em gráficos. É nesta secção que são desenvolvidas as funções.

Capítulo 7 - **Conclusões e Recomendações:** Inclui as conclusões finais extraídas no estudo, bem como as principais limitações gerais da dissertação. Apresenta, também, sugestões para trabalhos

futuros, na área da qualidade da água residual, após uma elevação por meio dos parafusos de Arquimedes.

Está ainda incluída na estrutura da dissertação uma secção com as referências bibliográficas utilizadas no trabalho, bem como anexos que serviram de suporte ao estudo em questão e que se deslocam do texto principal para melhor leitura. Aí se apresenta a informação sobre o planeamento e organização dos ensaios experimentais (Anexo I), as características técnicas dos parafusos de Arquimedes dos casos de estudo (Anexo II) e os resultados das medições efetuadas (Anexo III).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PRINCÍPIOS DA TRANSFERÊNCIA DE OXIGÉNIO

As águas residuais são uma mistura de matérias inertes ou química e biologicamente ativas, suspensas ou dissolvidas num meio aquoso predominante, sendo o oxigénio necessário em muitas reações químicas ou, principalmente, bioquímicas. Dada a importância deste elemento químico no metabolismo biológico faz-se, neste capítulo, uma introdução teórica sobre a transferência de oxigénio, considerando aspetos que ultrapassam o simples aumento de concentração no interior da massa líquida, que é o objeto desta dissertação, ao se anotarem consequências na própria biologia da massa global.

O fenómeno de transferência de oxigénio ocorre, essencialmente, pela diferença de solubilidade entre gás e líquido, isto é, o gradiente de concentração. Deste modo, a concentração de OD na superfície da bolha de gás é superior à da fase líquida. Por esta razão, há transferência de oxigénio, da bolha de gás para o líquido e, por último, para o interior das células, onde será consumido (Doran, 1995, mencionado por Manyuchi, 2010).

No percurso do transporte de oxigénio, do seio da bolha de gás até ao consumo final da célula, segundo Bailey e Ollis (1986), existem várias resistências físicas, estando estas representadas no esquema da Figura 1. Por sua vez estas resistências são provocadas pela viscosidade do meio líquido, que é consequente do desenvolvimento da cultura de microrganismos.

As resistências físicas representadas na Figura 1, podem ter a seguinte designação (Salgado, 2011): (1) Transporte do seio da bolha de gás até à interface do gás-líquido; (2) Transição da interface gás-líquido; (3) Difusão através do filme líquido estagnado que rodeia a bolha de gás; (4) Transporte no seio do meio líquido até uma segunda zona estagnada que rodeia as células; (5) Difusão na segunda zona estagnada externa ao agregado de células; (6) Travessia da interface líquido-agregado de células; (7) Transferência no seio do agregado de células; (8) Travessia da membrana celular; e (9) Difusão interna na célula, estando associado ao consumo final de oxigénio pela célula.

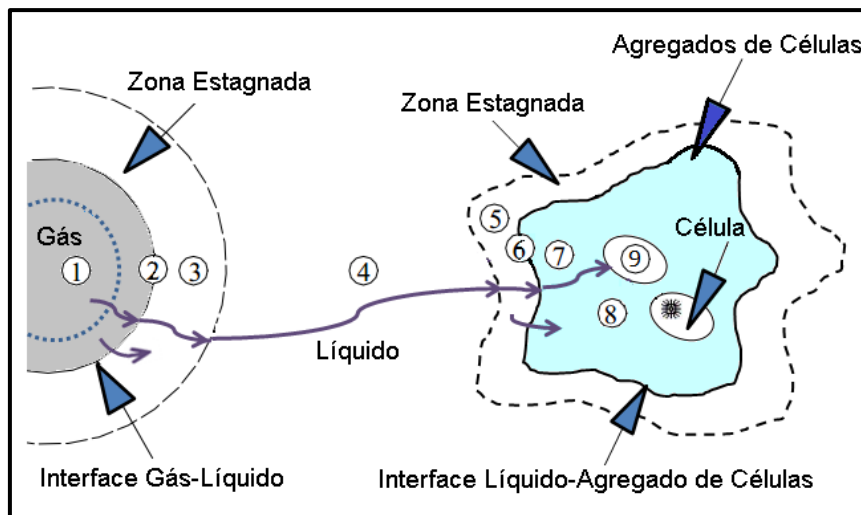


Figura 1 – Resistências envolvidas no transporte do oxigênio do seio gasoso para o interior da célula (Adaptado de Bailey e Ollis, 1986).

Segundo Bailey e Ollis (1986), os fatores que podem influenciar as resistências associadas à transferência de oxigênio são: temperatura, solubilidade do oxigênio, hidrodinâmica da bolha de gás, fenômenos nas interfaces, atividade microbiana e características qualitativas do meio.

Chisti (1989) sustenta que nem todas as resistências são significativas. A resistência (4) é desprezável, pois o líquido estará sujeito a condições de mistura e a sistemas de arejamento, obtendo-se assim uma turbulência significativa, disponibilizando facilmente o oxigênio às células, pelo que haverá uma rápida difusão de oxigênio. Da mesma forma, as resistências envolvidas no agregado de células, ou seja, as resistências (5) a (7), são pouco significativas, devido às exíguas dimensões da célula e à grande área de interface líquida que rodeia a sua superfície, apresentarem uma diferença reduzida de densidade. As resistências (8) e (9) também são desprezáveis, em resultado das pequenas dimensões das células e das altas taxas de assimilação de oxigênio. Porém, importa referir, que a situação indispensável no processo de transferência de massa será disponibilizar o oxigênio no meio líquido de modo a que as células possam consumi-lo.

Neste sentido, Chisti (1989) explica que a interface gás-líquido oferece maior resistência à transferência de oxigênio, logo esta zona estabelece a restrição para o transporte do oxigênio. Por esta razão, existem algumas teorias, as quais se apresentam em seguida, que descrevem o fenómeno de transferência de massa gás-líquido, em específico, na zona da interface gás-líquido.

2.2 TEORIAS DA TRANSFERÊNCIA DE MASSA

Metcalf & Eddy Inc (2014) refere que existem três teorias que permitem explicar o fenómeno de transferência de gás através da interface gás-líquido: a teoria dos dois filmes, proposta por Lewis e

Whitman (1924), a teoria da penetração, proposta por Higbie (1935) e a teoria da renovação superficial proposta por Danckwerts (1951).

Entre as teorias referidas, a primeira será a mais comum e simples, uma vez que, na maioria das situações, manifesta resultados idênticos quando comparados com os resultados de teorias mais complexas. Deste modo, a descrição geral de cada teoria apresenta-se em seguida, com maior enfoque na teoria dos dois filmes proposta por Lewis e Whitman, em 1924.

• Teoria dos Dois Filmes

O modelo físico, no qual a teoria dos dois filmes se baseia, segundo Metcalf & Eddy Inc (2014), é composto pela interface gás-líquido e por duas camadas de fluido estagnadas existentes junto à sua superfície. Estas camadas finas são designadas por filmes, um na fase líquida e outro na fase gasosa, como mostra o esquema representativo da Figura 2.

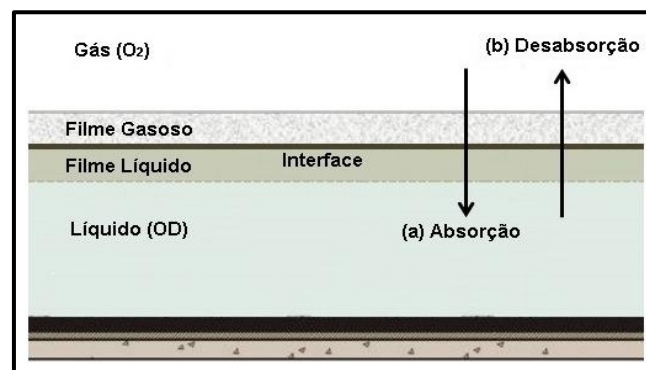


Figura 2 – Esquema simplificado da definição da teoria dos dois filmes, considerando a transferência de oxigênio.

Conforme ilustrado no esquema da Figura 2, são considerados dois processos de transferência de gases na interface (Metcalf & Eddy Inc, 2014):

- Absorção: o gás contido na atmosfera gasosa é transferido para fase líquida.
- Desabsorção: o gás dissolvido no líquido é transferido para a fase gasosa.

Além disso, o sistema tende a estabelecer uma relação de equilíbrio, isto é, as transferências para a atmosfera gasosa equilibram-se com as transferências para o líquido (Monteiro, 1997). Assim, há tendência para se atingir o equilíbrio da solubilidade do gás no líquido, ou seja, a concentração de saturação do OD.

A teoria dos dois filmes defende que toda a resistência à transição das moléculas de gás para a fase líquida, ou seja, à absorção do gás, localiza-se nos dois filmes. Por isso, a transferência de massa dá-se através dos filmes, apenas por difusão molecular, sendo, assim, normalmente lineares, os gradientes de concentração (Chisti, 1989).

Geralmente, as concentrações em ambas as fases são constantes e as concentrações na superfície de separação gás-líquido encontram-se em equilíbrio. Na Figura 3 encontra-se um esquema representativo dos gradientes de concentração que existem na transferência de massa desde da bolha de ar até à massa líquida (adaptada de Chisti, 1989).

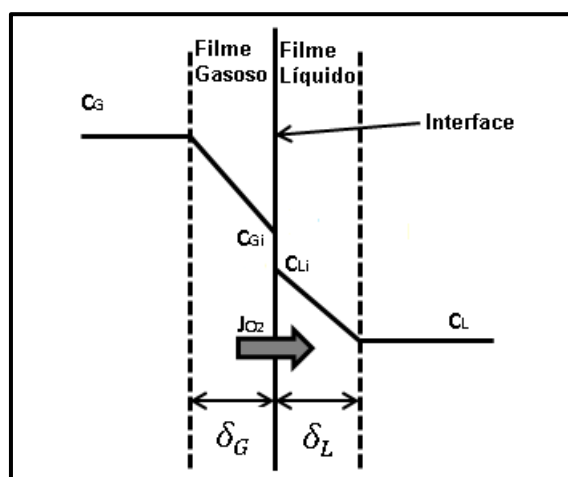


Figura 3 – Gradientes de concentração nas vizinhanças da interface gás-líquido existentes na transferência de massa de uma bolha de gás para o líquido (Adaptado de Chisti, 1989).

Perante o esquema dos gradientes de concentração, de acordo com Chisti (1989) e Metcalf & Eddy Inc (2014), a velocidade de transferência de massa ou fluxo de massa de oxigênio por difusão molecular, no sentido das concentrações decrescentes de oxigênio, de acordo com a expressão (2.1) da primeira lei de Fick (1855) é dada por:

$$J_{O_2} = -D_{O_2} \frac{\Delta C}{\Delta x} \quad (2.1)$$

onde, J_{O_2} corresponde ao fluxo de massa do oxigênio [$\text{mol O}_2/\text{m}^2.\text{s}$], D_{O_2} é o coeficiente de difusão molecular do oxigênio [m^2/s], ΔC representa a variação da concentração [$\text{mol O}_2/\text{m}^3$] e Δx designa a espessura do filme [m].

Chisti (1989) refere que a equação (2.1) da lei de Fick descreve o fluxo de massa de oxigênio no filme gasoso e no filme líquido. Além disso, de acordo com Chisti (1989), os filmes de gás e líquido são duas finas camadas de fluido, ou seja, as concentrações junto da interface não são quantidades mensuráveis, desta forma considera-se que não há acumulação de massa na interface, pois supõe-se que não há resistência à transferência na interface e a situação de estado estacionário.

Assim, como resultado da teoria dos dois filmes, obtém-se a expressão (2.2):

$$J_{O_2} = k_G(C_G - C_{Gi}) = k_L(C_{Li} - C_L) \quad (2.2)$$

sendo J_{O_2} o fluxo de massa do oxigénio [$\text{mol O}_2/\text{m}^2.\text{s}$], C_G a concentração de oxigénio no meio gasoso [$\text{mol O}_2/\text{m}^3$], C_{Gi} e C_{Li} as concentrações de oxigénio da fase gasosa e da fase líquida, respetivamente, na interface [$\text{mol O}_2/\text{m}^3$] e C_L a concentração de OD na fase líquida [$\text{mol O}_2/\text{m}^3$].

Os valores k_G e k_L correspondem aos coeficientes de transferência de massa no filme gasoso e no filme líquido, respetivamente [m/s]. Segundo Lewis e Whitman (1924) e com base na lei de Fick (1855), ambos os coeficientes correspondem à relação $D/\Delta x$, isto é, à divisão do coeficiente de difusão pela espessura do filme do respetivo fluido.

Dado que as concentrações dos filmes de gás e líquido junto à superfície da interface estão em equilíbrio, o fluxo mássico (J_{O_2}) exprime a força motriz em termos de variação de concentração de oxigénio na fase gasosa ou na fase líquida (Chisti, 1989), resultando na seguinte equação (2.3):

$$J_{O_2} = K(C_L^* - C_L) \quad (2.3)$$

sendo K o coeficiente global de transferência de massa [m/s], C_L^* a concentração de OD na fase líquida em equilíbrio com a fase gasosa, ou seja, concentração de saturação [$\text{mol O}_2/\text{m}^3$] e C_L a concentração de OD na fase líquida [$\text{mol O}_2/\text{m}^3$].

Segundo Metcalf & Eddy Inc (2014), assume-se a resistência total da transferência de massa de oxigénio é provocada pelo filme líquido, existindo equilíbrio na interface entre a fase gasosa e a fase líquida. Além disso, a concentração de OD está relacionada com a sua pressão parcial através da lei de Henry (1802). A aplicabilidade da lei de Henry (1802) justifica-se pela baixa solubilidade do oxigénio no líquido. Desta forma, Metcalf & Eddy Inc (2014) referem, com base na lei mencionada, que as relações de equilíbrio podem-se escrever nas equações (2.4) e (2.5):

$$P_G = H \cdot C_L^* \quad (2.4)$$

$$P_{Gi} = H \cdot C_{Li} \quad (2.5)$$

onde P_G denota a pressão parcial de oxigénio no seio da fase gasosa, em equilíbrio hipotético com a concentração de OD na fase líquida, C_L^* [Pa]. O valor de P_{Gi} representa a pressão parcial de oxigénio na interface, no lado do filme de gás, em equilíbrio com a concentração de soluto na interface gás-líquido, C_{Li} [Pa]. Por último, H corresponde à constante de proporcionalidade ou constante da lei de Henry [$\text{Pa.m}^3/\text{mol}$].

Manipulando as expressões (2.2), (2.4) e (2.5), tal como Chisti (1989) e Metcalf & Eddy Inc (2014) afirmam, a resistência total à transferência de massa, R_T , é dada pela soma das duas resistências parciais dispostas em série, uma localizada no lado gasoso, R_G , e outra localizada no lado líquido, R_L . Deste modo, os mesmos autores afirmam que a resistência total de transferência de massa, é obtida através da relação de coeficientes de transferência de massa, isto é, a expressão (2.6):

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{Hk_G} + \frac{1}{k_L} \quad (2.6)$$

Contudo, segundo Fonseca e Teixeira (2007) citados por Pereira (2012), como o oxigénio e outros gases é pouco solúvel no líquido ($C_G \gg C_L$), a constante H assume valores bastante elevados. Para além disto, como $k_G \gg k_L$, ou, também, $\frac{1}{Hk_G} \ll \frac{1}{k_L}$, resulta que $K \approx k_L$. Contudo, pode afirmar-se que a resistência total à transferência de massa de oxigénio dissolvido se situa no filme líquido, desprezando-se a resistência do filme gasoso.

• Teoria da Penetração

A teoria da penetração de Higbie (1935) defende que a transferência de massa na interface do sistema dos dois filmes é um processo não estacionário. Nesta teoria admite-se que pequenos elementos da camada de fluido líquido em repouso junto à superfície da interface, onde ocorre a transferência de massa por difusão molecular, são periodicamente substituídos por elementos advindos do seio do líquido, onde há turbulência (Santos, 2004).

O fluxo mássico de oxigénio tal como a teoria dos dois filmes, será em função da variação da concentração de OD e do coeficiente de transferência de massa no filme líquido. Então, de acordo com Higbie (1935) citado por Silva (1971), o fluxo de massa é dado pela equação (2.7):

$$J_{O_2} = 2 \sqrt{\frac{D_{O_2}}{\pi \theta}} (C^*_L - C_L) \quad (2.7)$$

onde θ representa o tempo de exposição do líquido ao gás e o significado dos restantes símbolos pode ser encontrado na simbologia geral.

Ainda segundo Silva (1971), o coeficiente de transferência de oxigénio no filme líquido (k_L) descreve-se como $2 \sqrt{\frac{D_{O_2}}{\pi \theta}}$.

Observando a expressão (2.7), quanto menor o tempo de contacto entre líquido e gás, mais elevadas serão as trocas de oxigénio, tal como menciona Santos (2004).

• Teoria da Renovação Superficial

Danckwerts (1951) propôs a chamada teoria da renovação superficial, sendo uma modificação da teoria de penetração apresentada por Higbie (1935), que estabeleceu que os elementos de líquido estagnante junto da superfície da interface podem ser substituídos num dado instante, independentemente do seu tempo de permanência na interface e de forma aleatória devido à turbulência no líquido (Santos 2004). Como resultado da teoria da renovação superficial obtém-se a equação (2.8):

$$J_{O_2} = \sqrt{D_{O_2} r_s} (C^*_L - C_L) \quad (2.8)$$

em que r_s corresponde à taxa de renovação superficial (Silva, 1971), isto é, à velocidade de renovação dos elementos de fluido. Por outro lado, Danckwerts (1951) citado por Silva (1971) propôs o coeficiente de transferência de massa do lado do líquido (k_L) em função do coeficiente de difusão (D_{O_2}) e a taxa de renovação de superfície (r_s), ou seja, $\sqrt{D_{O_2} r_s}$.

Contudo segundo Chisti (1989), todas as teorias descritas anteriormente, defendem igualmente que o fluxo de massa de oxigénio é em função de uma força motriz expressa pela variação de concentração de OD, ($C^*_L - C_L$), e do coeficiente de transferência de massa no filme líquido (k_L). No entanto, em contrapartida, o coeficiente de transferência de massa varia conforme os fundamentos das teorias apresentados pelos autores.

2.3 PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA: REAREJAMENTO

O (re)arejamento é um processo de absorção, em que o oxigénio, componente em cerca de 21% do ar atmosférico, é transportado para uma massa de água, através do contato existente entre a superfície do líquido e a atmosfera. Este contacto é uma consequência da turbulência significativa do escoamento criada por singularidades, isto é, estruturas hidráulicas (Soares *et al.*, 2004), mesmo que a água entre em contato com a estrutura num curto intervalo de tempo.

Baylar e Bağatur (2000) e Baylar *et al.* (2008) explicam que, a turbulência na água, causada pelas estruturas hidráulicas, provoca o arrastamento do ar para o interior da massa líquida, sob a forma de bolhas de ar, permitindo aumentar a concentração de OD na água. Estas bolhas de ar aumentam a área superficial disponível para a transferência de massa.

A taxa de transferência de oxigénio do ar atmosférico para o líquido (dC/dt), também designada, em terminologia anglo-saxónica, por OTR (*Oxygen Transfer Rate*), consiste numa equação de 1ª ordem, em que a taxa de absorção é diretamente proporcional ao deficit de oxigénio dissolvido (Adeney e Becker, 1919). Essa equação, foi definida por Thomann e Muller, em 1989, com base no trabalho desenvolvido no rio Ohio por Streeter e Phelps, em 1925 (citado por Matos, 1991). A equação pode ser escrita como (Equação 2.9):

$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C^*_L - C_L) \quad (2.9)$$

em que $k_L a$ se designa por coeficiente de rearejamento ou coeficiente volumétrico de transferência de oxigénio do lado líquido, com referência à fase líquida [s^{-1}] e o valor a representa a

forma simplificada da divisão A/V , isto é, a área de contacto gás-líquido por unidade de volume de líquido, ou seja, o inverso da profundidade média do escoamento $[m^{-1}]$.

O (re)arejamento da água a partir da atmosfera é obtido, maioritariamente, a partir de técnicas gravíticas, utilizando estruturas hidráulicas tais como quedas bruscas, cascatas de degraus, chapa ondulada em plano inclinado e açudes. São pouco dispendiosas, desde que esteja disponível diferença de energia potencial, dado que não utilizam energia mecânica, e podem ser aplicadas em rios e águas residuais (mencionado por Kahil e Seif, 2014).

No entanto, Emiroglu et al. (2006) e Baylar et al. (2008) explicam que a equação (2.9) exclui as fontes e sumidouros de OD num fluxo de água, porque as taxas são baixas comparativamente à transferência de oxigénio através da turbulência na interface criada por estruturas hidráulicas, e da enorme quantidade de ar que é arrastado no fluxo de água. Assim, Gameson (1957) define a eficiência de estruturas no rearejamento E , através da seguinte equação (2.10):

$$E = 1 - \frac{1}{r_{OD}} = \frac{OD_j - OD_m}{C^*_L - OD_m} \quad (2.10)$$

em que, OD_j e OD_m representam a concentração de OD a jusante e a montante da estrutura hidráulica $[mg/L]$, respetivamente; C^*_L é a concentração de saturação de OD $[mg/L]$; e o valor r_{OD} corresponde à razão de deficit de OD, isto é, $[(C^*_L - OD_m)/(C^*_L - OD_j)]$.

A eficiência de rearejamento varia entre 0 e 1. Quando $E=1$ significa a concentração de OD a jusante é igual à concentração de saturação, ou seja, trata-se de transferência total de oxigénio até ao valor de saturação devido à estrutura. Por outro lado, na situação de não haver rearejamento, então $E=0$ (Emiroglu e Baylar, 2006 e Kahil e Seif, 2014).

A transferência de oxigénio provocada numa dada estrutura hidráulica é influenciada pela temperatura de água, pelo que os investigadores, conforme consta em Baylar et al. (2008), corrigem a eficiência de rearejamento para uma temperatura de referência, cuja temperatura padrão é $20^\circ C$, para fins de comparação da eficiência da estrutura no aumento do teor de OD.

Para as estruturas hidráulicas, Gulliver et al. (1990) relacionam a eficiência de rearejamento com a sua influência na temperatura e apresentaram a seguinte equação (2.11):

$$E_{20} = 1 - (1 - E)^{\frac{1}{F_t}} \quad (2.11)$$

sendo que E representa a eficiência de rearejamento à temperatura da água (T) em grau Celsius, E_{20} é a eficiência de rearejamento à temperatura de $20^\circ C$, e F_t trata-se do fator de correção da temperatura. O fator f é calculado a partir da expressão (2.12):

$$F_t = 1.0 + 0.02103(T - 20) + 8.261 \times 10^{-5}(T - 20)^2 \quad (2.12)$$

Os estudos científicos sobre o rearejamento de água existentes na literatura incidem, sobretudo, sobre o rearejamento de água limpa ou pouco poluída originado pela turbulência causada pela

bombagem e estruturas hidráulicas existentes em rios. Kahil e Seif (2014) afirmam que Gameson, em 1957, foi o primeiro a descrever o potencial de rearejamento dos açudes instalados em rios.

Em 1999, Butts et al., efetuaram um estudo da evolução da eficiência de rearejamento em estações do SEPA (*Sidestream Elevated Pool Aeration*), localizadas num curso de água doce em Chicago. A típica estação do sistema SEPA está equipada por parafusos de Arquimedes seguida de cascatas em degraus, com o intuito de arejar o volume de água bombeado do fluxo de água, que retorna ao mesmo. Estes autores concluíram que os parafusos de Arquimedes contribuem significativamente, em cerca de 50 a 60% da reoxigenação total da água nas estações do SEPA.

Dursun (2015) registou no seu trabalho que o canal aberto tipo *Parshall*, cuja função principal é a medição de caudal, é eficaz na transferência de oxigénio, ou seja, pode ser utilizado para aumentar a concentração de OD num fluxo de água, em situações em que os canais possuem inclinações reduzidas ou nulas. Este autor também concluiu que eficiência aumenta com a redução da largura da garganta do canal e respetivo aumento do comprimento.

O acréscimo da concentração de OD em águas residuais promovido por estruturas hidráulicas, nomeadamente, cascatas de degraus e quedas verticais em coletores, têm sido alvo de alguns trabalhos científicos.

O trabalho de Kahil e Seif, em 2014, realizado nas áreas montanhosas do Líbano, prova que as cascatas têm a capacidade suficiente de rearejamento das águas residuais, pelo que podem ser utilizadas no tratamento de águas residuais, especialmente, em zonas montanhosas, sem recorrer a arejamento por injeção mecânica dispendiosos, o que favorece o consumo de energia. Kahil e Seif (2014) fazem referência ao trabalho de Sabry (2010), em que os sistemas de arejamento natural, ou seja, o rearejamento atmosférico, conduz a redução até 90% do consumo em energia, em relação ao arejamento mecânico.

Estudo conduzido por Sabry et al., em 2010, sobre o desempenho e viabilidade de técnicas de rearejamento de águas residuais, demonstrou que as cascatas apresentam a melhor eficiência de remoção de CBO (Carência Bioquímica de Oxigénio), CQO (Carência Química de Oxigénio) e SST (Sólidos Suspensos Totais); e proporcionam maior acréscimo da concentração de OD na água residual.

Matos (1991), Almeida (1999), e Soares et al. (2004), por sua vez, efetuaram ensaios experimentais de rearejamento em quedas de coletores de águas residuais, em que propuseram expressões para estimar a razão de défices de OD, permitindo estimar as eficiências de rearejamento provocado por quedas em coletores. Nos sistemas de drenagem de águas residuais é essencial garantir elevados teores de OD, estabelecendo-se condições de aerobiose, que evitam a formação de gases tóxicos e/ou corrosivos.

Segundo o estudo conduzido por Monayeri et al. (2006), o rearejamento em quedas em água residual parece ser menor que em água limpa, analisado nas mesmas condições, isto é, a alturas de queda

iguais. Os mesmos autores afirmam que a concentração de matéria orgânica deverá ser considerada em equações para estimar a capacidade cascatas no rearejamento.

O trabalho desenvolvido por Abbood e Abood (2014) confirmou que o aumento da CQO reduz a eficiência de rearejamento, isto deve-se ao efeito da carga poluente sobre os teores de oxigênio dissolvido na água.

Khalifa et al. (2011) propuseram um modelo matemático do efeito da carga poluente, em termos de CQO, na eficiência de rearejamento, com o fim de alcançar um maior acréscimo da concentração de oxigênio dissolvido através de cascatas, em ETAR. Ainda no mesmo estudo, os resultados mostram o efeito promissor de rearejamento das cascatas, por isso os autores consideram que deverão ser utilizadas com maior frequência em cursos de água e ETAR.

O rearejamento provocado por a uma estrutura hidráulica, conforme descrito anteriormente, é influenciado pela temperatura da água, carga orgânica presente da água e caudal, como defendem diversos autores. Outros fatores são revelantes no rearejamento atmosférico, tais como a altura de água a jusante da estrutura hidráulica, perda de carga (ou altura de queda), *deficit* de oxigênio dissolvido a montante da estrutura hidráulica e a configuração da descarga

2.4 FATORES QUE AFETAM A CONCENTRAÇÃO DE SATURAÇÃO DE OD

A concentração de saturação de OD na massa líquida, também denominada por solubilidade, isto é, as transferências para a atmosfera equilibram-se com as transferências para o líquido (Monteiro, 1997) A concentração de saturação de OD depende de diversos fatores, dos quais destacam-se a concentração de sólidos dissolvidos, a temperatura e pressão atmosférica.

Segundo Stenstrom e Gilbert (1980), citados por Matos (1991), a solubilidade das águas residuais domésticas, geralmente, corresponde a cerca de 95% da solubilidade da água destilada.

Assim sendo, de acordo com a Lei de Henry (1802), tal como se pode observar a expressão (2.6) anteriormente apresentada, a concentração de saturação de OD no líquido é diretamente proporcional à pressão parcial exercida pelo oxigênio sobre a massa de líquida, tal como mencionou Almeida, em 1997.

Salgado (2011) refere que a composição do meio líquido intervém na concentração de saturação, uma vez que a concentração do oxigênio dissolvido varia com a concentração de cloretos e concentração de sólidos dissolvidos

Normalmente quando há um aumento da concentração de sólidos dissolvidos na água, diminui a solubilidade do oxigênio. Conforme consta em Matos (1991), geralmente, as águas de consumo humano e as águas residuais, contêm uma concentração de cloretos, a qual é praticamente incapaz

para modificar o valor da concentração de saturação, excepto em situações como a ocorrência de infiltração de águas salobras e a intrusão salina. Portanto, a concentração de saturação de OD em água, à pressão atmosférica de 750 mm de Hg, calcula-se segundo a expressão (2.13) proposta por Eckenfelder e O'Connor (1961), citados por Matos (1991) e Salgado (2011) :

$$C^*_{760} = \frac{475 - 2,65 C_{sd}}{33,5 + T} \quad (2.13)$$

onde C^*_{760} é a concentração de saturação de OD para 1 atm, ou seja, para a pressão atmosférica igual a 760 mm de Hg [mg /L], C_{sd} corresponde à concentração de sólidos dissolvidos na água [mg/L] e T trata-se da temperatura da água [°C].

A temperatura da água, quando aumenta, conduz à diminuição da solubilidade do oxigénio, pois há uma redução da solubilidade e aumento da quantidade de microrganismos consumidores de oxigénio (Sousa, 2001). Segundo Truesdale et al. (1955), referido por Salgado (2011), a concentração de saturação de OD, considerando a temperatura do líquido, é dada pela expressão (2.14):

$$C^*_{760} = 14,16 - 0,3943 T + 0,007714 T^2 - 0,0000646 T^3 \quad (2.14)$$

A expressão de correção da concentração de saturação, atendendo à temperatura, é válida para a água pura, à pressão atmosférica de 750 mm de Hg; considerando que ar possui 21% de oxigénio.

Por outro lado, a concentração de saturação de OD aumenta com o aumento da pressão de saturação do oxigénio. Assim sendo, tal como apresenta Salgado (2011), a concentração de saturação, C^* [mg/L], poderá ser corrigida, segundo a pressão atmosférica, P [mm de Hg], através da equação (2.15):

$$C^* = C^*_{760} \frac{P - P_G}{760 - P_G} \quad (2.15)$$

onde P_G denota a pressão parcial do oxigénio [mm de Hg] e C^*_{760} corresponde à concentração de saturação à pressão atmosférica de 750 mm de Hg [mg/l].

3. PARAFUSOS DE ARQUIMEDES E A SUA UTILIZAÇÃO

3.1 HISTÓRIA: ORIGEM DO PARAFUSO DE ARQUIMEDES

A dependência da água em civilizações primitivas conduziu à construção de aparelhos para retirar a água de zonas baixas. Um dos primeiros sistemas de elevação terá sido um balde atado a uma corda, mais tarde suspenso por um gancho, e, posteriormente, por uma roldana.

Ao longo da História da Europa utilizaram-se máquinas elevatórias de água, entre as quais a picota (ou cegonha), o sarilho, a nora, a azenha, a bomba de *Ctesibius*, o parafuso de Arquimedes e o carneiro hidráulico. No entanto, esta última é considerada uma máquina de elevação de água dos tempos modernos (Ribeiro, 2014).

O parafuso de Arquimedes, ilustrado na Figura 4, é visto como um grande avanço nas máquinas hidráulicas, cujo princípio continua a ser bastante utilizado hoje em dia.

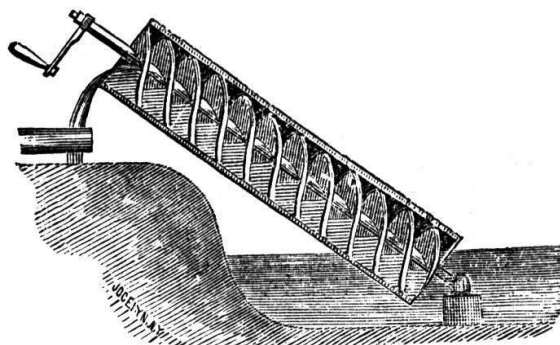


Figura 4 - Parafuso de Arquimedes (Fonte: Rorres, 2000).

Segundo a História, há registos que descrevem este aparelho no século VII a.C., criado pelo rei da Assíria (705 a.C. - 681a.C.), para a irrigação dos Jardins Suspensos da Babilônia e Nínive. Em 236 a.C., a invenção do parafuso de Arquimedes foi atribuída ao matemático Arquimedes (287 a.C. - 212 a.C.).

De acordo com o conceito clássico, com origem na Antiguidade, o funcionamento do parafuso de Arquimedes consiste num cilindro inclinado, dentro do qual existe um eixo central ligado a uma chapa em forma helicoidal. A extremidade inferior é imersa no fluido e, através de um movimento giratório contínuo, por meio de uma manivela, a água fica retida entre os espaços existentes na chapa

helicoidal e sobe ao longo do eixo inclinado, até transbordar a extremidade superior (Ribeiro, 2014). Este engenho primitivo seria movido recorrendo à força humana ou através de um moinho de vento.

Posteriormente, Leonardo da Vinci (1452-1519), concebeu um parafuso semelhante ao de Arquimedes, sendo a hélice substituída por um tubo contínuo disposto em torno do eixo central.

Na Holanda, os parafusos de Arquimedes foram muito utilizados em moinhos de ventos com a finalidade de drenar os *polders*. Estas estruturas hidráulicas artificiais são monitorizadas para evitar o avanço do mar. Deste modo, a Holanda é conhecida por recuperar a terra do mar, como tal, é referenciada com a frase "God created the world, but the Dutche created Holland".

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO PARAFUSO DE ARQUIMEDES

O parafuso de Arquimedes, também designado por bomba parafuso, é uma máquina hidráulica cuja função é o transporte de líquido entre dois pontos com elevações distintas, isto é, altura monométrica, aumentando a energia do líquido.

Trata-se de uma estrutura robusta e uma bomba helicoidal, que é composta por um veio tubular tendo à sua volta uma hélice, a qual realizará um movimento de rotação, movido por um motor elétrico situado no extremo superior do veio tubular, munido de uma caixa de velocidades, acoplamento e rolamentos. Além disto, o veio tubular da bomba parafuso efetua rotações com uma força de atrito mínima, sendo suportado em cada extremidade por uma chumaceira lubrificada.

Em termos de construção civil, este conjunto é instalado num plano inclinado, normalmente, aplicado num canal tipo "U" em betão armado ou em chapa de aço, igualmente inclinado. O canal pode estar a céu aberto ou, maioritariamente, é-lhe aplicada uma cobertura de peso leve, com a possibilidade de acesso fácil para manutenção da bomba parafuso. A título de exemplo, apresentam-se, nas Figuras 5 e 6, respetivamente, parafusos de Arquimedes instalados a céu aberto e com cobertura.



Figura 5 - Parafusos de Arquimedes a céu aberto, na ETAR de Serzedo (Fonte: Felmag, .2015).



Figura 6 - Parafusos de Arquimedes com cobertura, na ETAR de Paço de Sousa (Fonte: Penafiel TV, 2015).

A cobertura, normalmente, de origem sintética, é aplicada por forma a reduzir o ruído produzido pela bomba, criar segurança de trabalho e mitigar os efeitos da dilatação térmica do parafuso de Arquimedes (Landustrie, 2012). Em complemento, no caso de águas residuais, ajuda a controlar os odores e a emissão de aerossóis.

3.2.1 PRINCIPAIS COMPONENTES

O sistema que envolve o parafuso de Arquimedes é constituído por inúmeros componentes os quais possuem funções diferentes.

Na Figura 7 apresenta-se o esquema geral e simples de um parafuso de Arquimedes, estando citados os principais componentes envolventes no parafuso de Arquimedes: rolamentos, parafuso, acoplamento, caixa redutora de velocidades e motor elétrico. Desta forma, é feita, uma breve descrição da função aos componentes principais do parafuso de Arquimedes.

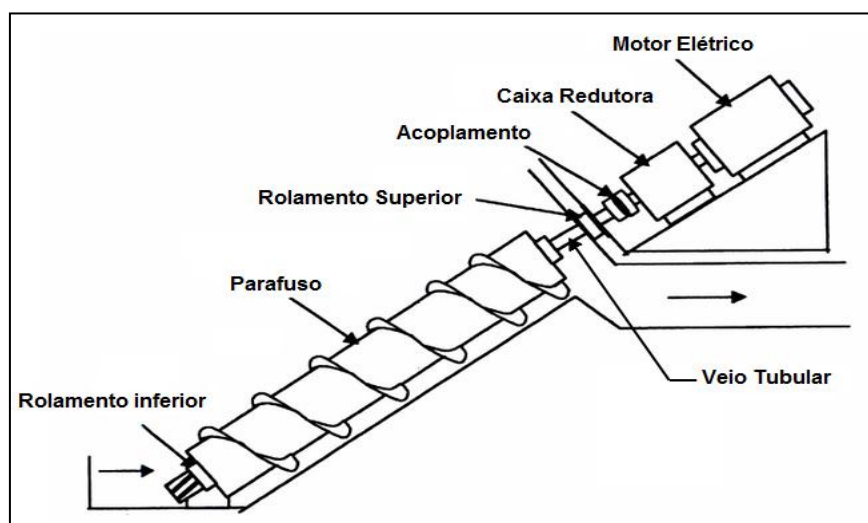


Figura 7 - Parafuso de Arquimedes (Adaptado de Spellman e Drinan, 2001).

O parafuso de Arquimedes, tal como ilustra a figura 7, é constituído por **rolamentos** de dois tipos: inferior e superior. Os rolamentos são finalizados para suportar o veio tubular, absorvendo as forças radiais e axiais originadas pelo veio, por sua vez, são transmitidas para a estrutura em betão, onde estão instalados os rolamentos e o veio. Além disto, os rolamentos também possibilitam, em simultâneo, a rotação livre do veio tubular.

Ambos os rolamentos, em geral, são colocados na estrutura de betão, ou seja, um elemento fixo, sendo aplicados com intuito de reduzir ao máximo as perdas por atrito. Salienta-se que o rolamento inferior está mergulhado no líquido, permitindo também absorver movimentos térmicos de dilatação e contração do parafuso.

O **parafuso** é constituído por uma, duas ou três hélices soldadas ao longo de um veio tubular. Este componente materializa o movimento de rotação do parafuso, permitindo a elevação do líquido para um nível superior. A manutenção do parafuso, implica um tratamento resistente à corrosão, conseguindo-se através da decapagem a jato de areia e uma pintura com tintas plásticas.

O movimento de rotação do parafuso é produzido por um **motor elétrico**, localizado à saída do parafuso de Arquimedes. Existe uma **caixa redutora** de velocidade, com a utilidade de reduzir proporcionalmente a velocidade de rotação do parafuso, a qual, geralmente está fixa. Porém, ambos os elementos constituem a designada unidade de acionamento.

As ligações motor elétrico/caixa redutora e caixa redutora/parafuso são feitas por meio de acoplamentos. Além disso, existem correias em V entre o motor e a caixa redutora com a função de absorver eventuais cargas de choque e precaver mudanças bruscas de velocidade.

A unidade de acionamento e os acoplamentos encontram-se fora do canal. Estas instalações mecânicas deverão equipadas por uma caixa de proteção de chapa de aço. Assim, os custos de construção civil estão associados apenas às ligações ao parafuso de Arquimedes de entrada e de saída do líquido.

Em situações com vários parafusos de Arquimedes, a unidade de acionamento e os acoplamentos ficarão inseridos num pequeno edifício, adequado à finalidade.

Os parafusos de Arquimedes podem também ser instalados em infraestruturas subterrâneas (Motta, 1982).

3.2.2 MECANISMO DO MOVIMENTO

O parafuso de Arquimedes trata-se de uma bomba hidráulica e pertence ao grupo das bombas volumétricas. Deste modo, o funcionamento do parafuso de Arquimedes é originado por um motor elétrico que transmite energia mecânica ao seu veio, para fornecer energia hidráulica ao escoamento.

Consegue-se desta forma, colocar em rotação o veio tubular do parafuso, transmitindo ao líquido um acréscimo de energia, em que volumes isolados de líquido são transportados para outro local (de descarga), ou seja, move o líquido de uma posição de menor energia potencial para outra de maior energia potencial.

Tratando-se de uma bomba volumétrica (também designada por bomba de deslocamento positivo) e de escoamento pulsante, o fluido transita, sucessivamente, nos espaços das hélices ao longo do eixo central, com volumes conhecidos. O movimento do fluido ocorre na mesma direção das forças transmitidas e em torno do veio tubular.

3.2.3 NOMENCLATURA

A instalação do parafuso de Arquimedes, em plano inclinado, possui um conjunto características, sobretudo, as dimensões da geometria e os níveis de líquido, sendo definidas pelo fabricante.

A Figura 8 esquematiza uma instalação de elevação por parafusos de Arquimedes com os respectivas dimensões, retirado do catálogo do fabricante Landustrie. É ainda apresentado os níveis de líquido a montante e a jusante do parafuso de Arquimedes. Alguns destes níveis, quando atingem o mínimo ou o máximo, podem efetuar o arranque e/ou paragem da bomba.

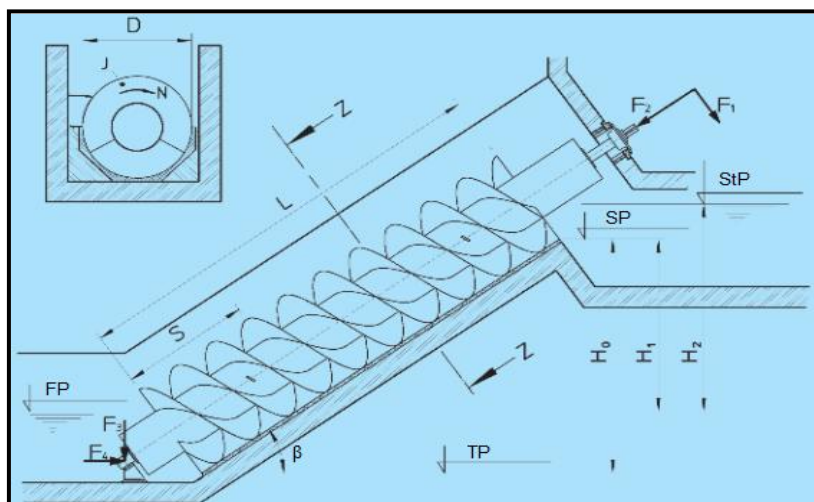


Figura 8 - Parâmetros da geometria do parafuso de Arquimedes (fonte: Catálogo da Landustrie, 2012).

As designações indicadas no esquema anterior referem-se a:

FP - Nível máximo de enchimento, o qual permite atingir melhor eficiência, com grande consumo energético [mm]	β - ângulo da instalação [°]
TP - Nível mínimo de líquido a montante, no qual o parafuso pára [mm]	L - comprimento do parafuso [mm]
StP - Nível máximo de líquido bombeado [mm]	S - passo do parafuso [mm]
SP - Ponto de descarga [mm]	D - diâmetro do parafuso [mm]
H_0 - Altura de elevação hidráulica SP - TP [mm]	J - Número de voltas [-]
H_1 - Altura de elevação hidráulica SP-FP [mm]	N - Velocidade do parafuso [rpm]
H_2 - Altura de elevação hidráulica StP -FP [mm]	F_i - Força de origem mecânica [kN]

Os parâmetros inclinação, comprimento e diâmetro do parafuso são, geralmente, estimados através da quantidade de afluente, isto é, o caudal do líquido a ser elevado, e ainda, pela localização do

parafuso. Porém, o número voltas, o passo do parafuso e o diâmetro do veio (d) são parâmetros determinados para otimizar o funcionamento da bomba parafuso (Fernandes, 2008).

3.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO PARAFUSO DE ARQUIMEDES

O parafuso de Arquimedes apresenta-se em várias dimensões e alguma variedade de instalação no canal, consoante o fabricante. Contudo, será concebido e construído conforme as dimensões e capacidade exigidas por cada projeto.

Como em todos os equipamentos elevatórios, existem vantagens e desvantagens que estão associadas ao parafuso de Arquimedes, as quais deverão ser consideradas para a seleção de uma bomba em projetos de instalações elevatórias.

As **vantagens** técnicas dos parafusos de Arquimedes, enunciadas em catálogos pelos fabricantes Landustrie, Lakeside Equipment Corporation e Andritz Atro, são:

- Vida útil elevada, dado que, é pouco frequente o surgimento de avarias e danos no funcionamento, causados por desgaste mecânico dos elementos. Porém, a manutenção do equipamento é obrigatória.
- Operação simples e custos de manutenção reduzidos. O desgaste mecânico dos elementos complementares ao parafuso de Arquimedes, normalmente, advém da redução do atrito devido às baixas velocidades de operação. Além do desgaste das peças, também haverá produção de calor. Portanto, a simples manutenção obrigatória inclui apenas mudanças de óleo e averiguação de todos os pontos de lubrificação (Lakeside Equipment Corporation, 2004).
- Baixos custos de obras de construção civil envolventes no conjunto do equipamento, isto é, está associado apenas ao sistemas de canais de betão armado e ao eventual edifício.
- Não é obrigatório a existência de uma câmara de grades a montante para remoção de sólidos. Uma vez que este equipamento, tem a capacidade de funcionar com líquidos carregados de sólidos, estes são transportados juntamente com o líquido, estando livre de obstruções, o que seria de esperar nas bombas centrífugas para as mesmas condições.
- Aplicável em situações com grande variação de caudais (artigo 174º do DR 29/95, de 23 de Agosto) com pequena redução de eficiência. Este equipamento funciona a uma eficiência constante e elevada, existindo um ajuste automático da capacidade da bomba de elevação de acordo com as características do afluente.
- Invulgar ocorrência do fenómeno de cavitação, dado que a velocidade angular é baixa e o equipamento é insensível às características do líquido a montante, ou seja, evita problemas de desgaste dos sólidos em suspensão sob a superfície do equipamento.

As **desvantagens** consistem no seguinte:

- Aplicável a pequenas alturas de elevação, de acordo com artigo 174º do DR 29/95, de 23 de Agosto. A altura de elevação será no máximo 7m ou 8m (Galvão, 2002 citado por Fernandes, 2008). Contudo, perante alturas superiores, será necessário dispor os parafusos de Arquimedes em duplo estágio para vencer uma maior diferença de altura.
- Requer de espaço, na horizontal, para a instalação. Assim sendo, será limitado pela distância que separa os pontos de elevação (Tentúgal, 1989, citado por Fernandes, 2008).
- No fim de vida do parafuso de Arquimedes, existem grandes dificuldades com a sua manutenção, isto porque é difícil a obtenção de peças de reposição, o que torna o custo manutenção do equipamento elevado (Rodrigues et al., 2001).

Um aspeto importante reside no ângulo de inclinação da instalação da bomba parafuso, variando entre 30º e 40º. O ângulo de inclinação é um fator que influencia a eficiência do parafuso de Arquimedes. De acordo com o fabricante Lakeside (2004), o aumento de um grau (1º) da inclinação da instalação significa uma redução de 3% na capacidade deste equipamento, apesar de aumentar a altura máxima disponível.

As desvantagens apresentadas anteriormente, são decisivas para o projetista em optar por instalar o parafuso de Arquimedes ou outro tipo de bomba alternativa com a capacidade de elevação de águas residuais, considerando as exigências impostas pelo projeto.

3.4 APLICABILIDADE DO PARAFUSO DE ARQUIMEDES

As aplicações do parafuso de Arquimedes são variadas, estando presentes na produção de energia em cursos de água doce, regadio, drenagem nos solos, indústria, no tratamento de efluentes domésticos e efluentes industriais, na drenagem de águas residuais, assim como na elevação de detritos e de resíduos sólidos nesse caso, designa-se, usualmente, por parafusos sem fim.

No âmbito do saneamento, usa-se, frequentemente, em situações onde o líquido é viscoso, em muitas situações com mistura de detritos grosseiros ou outros sólidos, ou seja, a massa líquida está isenta de tratamento prévio. Além disso, é utilizado para caudais significativos e pequenas alturas de elevação. Contudo, nesta área específica, o parafuso de Arquimedes é aplicado, sobretudo nos grupos de bombagem de águas residuais ou de lamas.

As instalações elevatórias com parafusos de Arquimedes podem ser adotadas nos seguintes sistemas de saneamento:

- **Drenagem de Águas Residuais**

No que respeita o sistema de drenagem de água residuais, os parafusos de Arquimedes podem ser utilizados em coletores e emissários quando, para além de caudais elevados e pequenas alturas de elevação, pretende ultrapassar um único desnível topográfico para, em seguida, permitir o transporte gravítico da água residual.

- **Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR)**

Nas ETAR é habitual garantir a elevação de águas residuais, para uma cota superior do perfil hidráulico, recorrendo a grupos elevatórios. As instalações elevatórias por ação de parafusos de Arquimedes, são relativamente frequentes, que, por sua vez, poderão ser aplicáveis a montante e entre etapas da linha de tratamento de águas residuais.

O parafuso de Arquimedes, em grande parte, é aplicado à cabeça da ETAR, ou seja, localiza-se no início da obra de entrada. A elevação do afluente bruto até à etapa de gradagem, em grande parte, com recurso a parafusos de Arquimedes, é efetuada até uma cota capaz de acionar o transporte gravítico até ao final da linha líquida, pois o perfil hidráulico do processo de tratamento justifica assim a elevação inicial. Nesta situação, não será essencial instalar gradagem a montante dos parafusos de Arquimedes, porque este tipo de bomba, tal como referido na seção 3.3, tem a capacidade de transportar os sólidos juntamente com a água residual sem perigo de entupimento.

Por outro lado, em certas situações, a bomba parafuso é inserida no pré-tratamento, então implica localizar-se a jusante da operação unitária de gradagem, por vezes também poderá existir, entre a gradagem grossa e a gradagem fina ou tamisador, a elevação de caudal por intermédio de parafusos de Arquimedes. Estes casos devem-se, eventualmente, pela topografia do terreno, isto é, as cotas do terreno na área em que estão implantados os órgãos do tratamento preliminar possibilitarem que os parafusos de Arquimedes sejam instalados nas situações mencionadas e não imediatamente à conduta de chegada à ETAR.

Ainda em relação à localização dos parafusos de Arquimedes, em alguns casos, aplica-se em elevações intermédias entre órgãos de tratamento, ao longo da linha de fase líquida, de caudais significativos.

Nas ETAR, por vezes, também se aplica o equipamento de elevação em questão, no bombeamento do caudal de recirculação de lamas, pelo que, corresponde geralmente a um caudal elevado, por forma a obter a taxa de recirculação da ordem dos 50% - 300%. A título de exemplo, a ETAR de Beirolas é munida de parafusos de Arquimedes para a recirculação de lamas.

3.5 ELEVAÇÃO INICIAL POR PARAFUSOS DE ARQUIMEDES NAS ETAR EM PORTUGAL

As bombas tipo parafuso de Arquimedes, são frequentemente utilizadas em Portugal, nomeadamente em elevação inicial das águas residuais nas ETAR, quando assim exige o perfil hidráulico da linha de tratamento. Assim, durante a década de 1990, começou a instalação de parafusos de Arquimedes nas ETAR do país.

Nas ETAR de Portugal, atualmente, os grupos eletrobomba do tipo submersível são os mais frequentemente aplicados em elevação inicial e no processo de tratamento, apresentando exigências que não são impostas por outras bombas, tais como o espaço para a sua instalação e consequentemente, os custos de construção civil da obra são menores.

Porém, conforme a informação recolhida a partir do grupo de entidades gestoras das ETAR existentes em Portugal Continental, na Tabela 1 apresentam-se as ETAR equipadas com parafusos de Arquimedes em elevação inicial, com a respetiva entidade gestora dos municípios servidos.

Tabela 1 - Listagem de ETAR com elevação inicial por ação de parafusos de Arquimedes em Portugal Continental.

Designação da ETAR	Localização	Entidade responsável
ETAR de Frossos	Braga	AGERE
ETAR de Serzedelo II	Guimarães, Braga	Águas do Noroeste ¹
ETAR de Serzedo	Guimarães, Braga	Águas do Noroeste ¹
ETAR de Lordelo	Guimarães, Braga	Águas do Noroeste ¹
ETAR de Agra II	Vila Nova de Famalicão, Braga	Águas do Noroeste ¹
ETAR do Ave	Vila do Conde, Porto	Águas do Noroeste ¹
ETAR do Sousa	Lousada, Porto	Águas do Noroeste ¹
ETAR de Parada	Maia, Porto	SMEAS da Maia
ETAR de Paço de Sousa	Penafiel, Porto	SIMDOURO ¹
ETAR de Salgueiro	Oliveira de Azeméis, Aveiro	AMTSM
ETAR de Mealhada	Mealhada, Aveiro	Câmara Municipal de Mealhada
ETAR de Castelo Branco	Castelo Branco	Águas do Centro ²
ETAR Municipal de Pombal	Pombal, Leiria	Câmara Municipal de Pombal
ETAR de Pataias/ Alpedriz	Alcobaça, Leiria	Águas do Oeste ²
ETAR de Alcanena	Alcanena, Santarém	AUSTRA
ETAR de Santa Cruz/ Silveira	Torres Vedras, Lisboa	Águas do Oeste ²
ETAR de Alverca	Vila Franca de Xira, Loures	SIMTEJO ²
ETAR de Bucelas	Loures, Lisboa	SIMTEJO ²
ETAR de Frielas	Loures, Lisboa	SIMTEJO ²
ETAR de São João da Talha	Loures, Lisboa	SIMTEJO ²
ETAR de Beirolas	Loures, Lisboa	SIMTEJO ²
ETAR de Alcântara	Lisboa	SIMTEJO ²
ETAR da Quinta da Bomba	Seixal, Setúbal	SMAS de Almada

¹ Atualmente gerida pela nova empresa Águas do Norte, S.A.

² Atualmente gerida pela nova empresa Águas de Lisboa e Vale do Tejo, S.A.

Em Portugal, segundo a Tabela 1, destacam-se os distritos de Braga, Porto e Lisboa pela existência de maior número de ETAR munidas de parafusos de Arquimedes na elevação inicial do caudal afluente à ETAR, após a qual as águas residuais são encaminhadas graviticamente para os órgãos de tratamento a jusante.

Deste modo, entre as várias ETAR apresentadas anteriormente, para realização desta dissertação, foram visitadas 3, mais especificamente a ETAR de Alcântara, a ETAR de Bucelas e a ETAR de Frielas. Os parafusos de Arquimedes das estações de tratamento referidas, instalados na elevação inicial, possuem dimensões geométricas definidas e condições físicas distintas, isto é, com e sem cobertura. Neste sentido, as diferentes características permitem analisar a capacidade de arejamento associado ao funcionamento de sistemas de elevação por parafusos de Arquimedes.

4. METODOLOGIA

4.1 MODELO CONCEPTUAL

Em primeira instância, foi necessário recorrer-se à elaboração de uma listagem (capítulo 2) de ETAR (com elevação inicial de águas residuais por ação dos parafusos de Arquimedes) existentes e em funcionamento em Portugal Continental. Isto foi importante, dado o fato de ser perceptível quais as ETAR mais próximas da região pretendida (Lisboa e Setúbal).

Assim, o trabalho empírico da dissertação envolve a recolha de dados reais e informação sobre os parafusos de Arquimedes, objeto do estudo, em estações de tratamento do distrito de Lisboa. Como tal, foi necessário efetuar campanhas de ensaios experimentais, as quais serão descritas em seguida na secção 4.2. Posteriormente, procedeu-se a realização da análise dos dados recolhidos por meio de representações gráficas, de modo a compreender a evolução entre os parâmetros medidos, que são: oxigénio dissolvido (OD), temperatura da água residual (T) e caudal (Q). Por último, procedeu-se à construção de funções aplicando dois modelos estatísticos: regressão linear múltipla e regressão não linear.

Para melhor compreender esta exposição teórica, em seguida é apresentado o esquema da Figura 9 que mostra o enfoque desta dissertação:

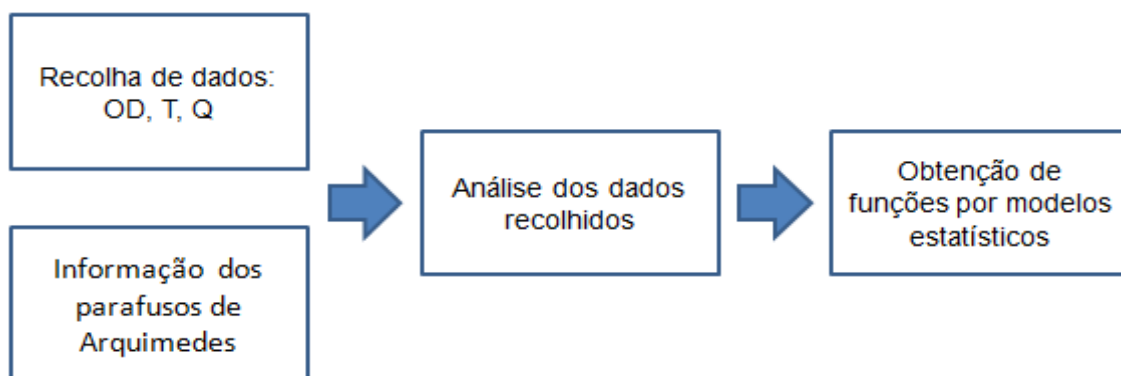


Figura 9 - Esquema do modelo conceptual.

4.2 CAMPANHAS EXPERIMENTAIS

O trabalho empírico da presente dissertação incluiu a realização de campanhas de ensaios experimentais, efetuadas em três estações de tratamento distintas, comumente, munidas de sistemas de elevação, nomeadamente, as ETAR de Alcântara, Bucelas e Frielas. As medições tiveram o

acompanhamento e apoio da SIMTEJO, entidade exploradora das ETAR em causa, que atualmente integra a nova empresa ALVT. Os ensaios experimentais foram sempre acompanhados por técnicos da SIMTEJO, por questões de segurança.

As campanhas experimentais, realizadas maioritariamente em meses de Verão, incluíram a análise, de determinados parâmetros, no próprio local: concentração de oxigénio dissolvido (OD), temperatura (T) e caudal (Q). A concentração de OD água residual é o parâmetro-chave na modelação do efeito de rotação do parafuso de Arquimedes, que provocará o aumento do teor de OD. A necessidade de medir a temperatura e o caudal justifica-se, pois ambos os parâmetros alteram a quantidade de OD na água residual.

Além da medição dos parâmetros mencionados anteriormente, é essencial considerar os parâmetros geométricos dos parafusos de Arquimedes, nomeadamente, o diâmetro e o comprimento. Estes foram obtidos através da consulta de documentos técnicos dos equipamentos facultados pela SIMTEJO. O objetivo da utilização destes parâmetros foi testar se estes influenciam ou não o crescimento da concentração de OD. As principais características dos parafusos de Arquimedes utilizados para as medições, incluindo o diâmetro e comprimento, encontram-se no **Anexo II**.

4.2.1 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE PARÂMETROS DE QUALIDADE

A concentração de oxigénio dissolvido e a temperatura na água residual foram quantificadas de imediato usando um medidor portátil digital ligado a uma sonda de OD através de um cabo, modelo HQ30d (da marca Hach), pertencente à SIMTEJO. Optou-se por um equipamento portátil, pois permite conhecer a concentração de OD e a temperatura na corrente de água residual e no instante em que é efetuada a medição, incluindo assim todas as alterações da qualidade da água residual que possam ocorrer durante as medições. Por isso, o sistema de medição utilizado nos ensaios é apresentado nas Figuras 10 e 11.



Figura 10 - Medidor HQ30d da Hach.



Figura 11 - Sonda de OD.

A sonda da Hach permite a medição de oxigênio (precisão do OD: $\pm 0,1$ mg/L para 0 - 8 mg/L e $\pm 0,2$ mg/L para valores acima de 8 mg/L) utilizando o método LDO (*Luminescent Dissolved Oxygen*), a qual emite um feixe de luz azul de alta energia provocando a excitação das moléculas de oxigênio, que emitem luz vermelha de volta. A concentração de oxigênio dissolvido é determinada a partir da medição do tempo de vida da luz vermelha. A sonda ainda inclui um sensor, o qual efetua a medição de temperatura da água residual (precisão de temperatura: $\pm 0,3$ °C).

Dado que são medições *in situ*, imergiu-se totalmente a sonda na corrente de água residual, pelo que os valores de OD e temperatura são lidos diretamente no visor do equipamento portátil. Porém, foi necessário manter a sonda imersa, durante alguns segundos, até que a leitura dos valores estabilizasse.

4.2.2 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE CAUDAL

A leitura do caudal de água residual bombeado inicialmente nas estações de tratamento foi obtida unicamente pelos caudalímetros instalados nas ETAR da realização das campanhas de ensaios experimentais.

A estimativa do caudal na ETAR de Alcântara é efetuada com recurso a 6 caudalímetros eletromagnéticos, sendo 4 utilizados em condições de tempo seco e 2 em tempo húmido, instalados na tubagem da alimentação da decantação primária. O princípio de funcionamento do caudalímetro eletromagnético consiste na lei de Faraday. Basicamente o sinal gerado é captado por dois elétrodos,

o qual corresponde à indução criada pela velocidade do fluxo do líquido que passa pela tubagem onde está instalado.

No caso das ETAR de Bucelas e Frielas, a medição de caudal realiza-se através de uma sonda ultrasónica instalada no canal *Parshall*, a jusante da elevação inicial. O princípio de funcionamento do caudalímetro ultra-sónico baseia-se na emissão/receção de ondas de alta frequência (aproximadamente 20 kHz), isto é, ondas ultrassónicas.

O sistema de supervisão e controlo permite que a informação do caudal registado a tempo real seja enviada e armazenada na base de dados da SIMTEJO. Assim, devido à distância significativa entre o caudalímetro e os locais dos ensaios, e à consequente dificuldade em registar o caudal durante as medições dos outros parâmetros, os valores de caudal registados na data, hora e ETAR da realização da campanha foram, posteriormente, fornecidos pela SIMTEJO.

4.2.3 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

- **Pontos de Amostragem**

Os ensaios experimentais para obtenção dos parâmetros OD e temperatura foram executados somente em dois pontos de amostragem, localizados a montante e a jusante dos parafusos de Arquimedes instalados na elevação inicial das ETAR de Alcântara, Bucelas e Frielas. A Figura 12 ilustra o esquema representativo da localização dos pontos de amostragem.

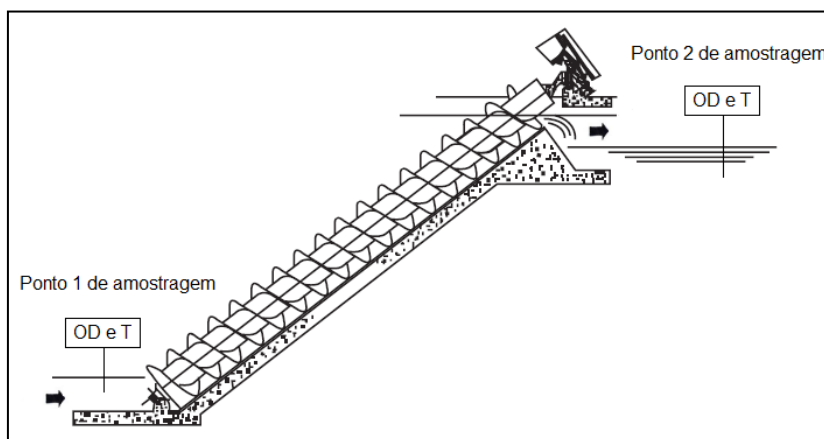


Figura 12 - Pontos de amostragem (adaptado de Lakeside Equipment Corporation, 2004).

- **Procedimento**

As medições foram realizadas no local de amostragem, ou seja, são ensaios realizados *in situ*, e o procedimento experimental consistiu em imergir a sonda diretamente na água residual, aguardar até que os resultados dos parâmetros estabilizassem e anotar o valor da leitura.

4.2.4 PLANO DE AMOSTRAGEM

O 1º ensaio decorreu na ETAR de Alcântara, consistiu numa primeira averiguação da evolução da concentração de OD no sistema de elevação inicial por parafusos de Arquimedes, podendo assim considerar-se um ensaio preliminar. Em termos do planeamento dos ensaios, foi alterado o número de ensaios experimentais, executando-se mais do que uma medição por dia pela eventual alteração da quantidade e qualidade do afluente bruto que ocorre ao longo do dia. Assim, na 1ª campanha de ensaios nas ETAR de Bucelas e Frielas, o procedimento descrito no subcapítulo 4.2.3, foi então efetuado durante um dia em cada ETAR; em que cada medição foi repetida 3 vezes por dia, em horas diferentes do dia, durante um período de tempo de cerca de 10 a 15 minutos.

A frequência e a duração dos ensaios foram alteradas na segunda campanha, por forma a não sobrecarregar os técnicos que acompanham os ensaios experimentais e otimizar o número de deslocações dos mesmos às instalações, tendo em vista que os ensaios realizados nas ETAR de Bucelas e Frielas foram realizados sempre no mesmo dia. Assim, na segunda campanha elaborada nas ETAR de Alcântara, Bucelas e Frielas, cada medição foi repetida 2 vezes por dia, em diferentes horas do dia, durante um intervalo de tempo de cerca de 10 a 15 minutos para o primeiro ensaio e 20 a 25 minutos para o segundo ensaio.

O plano de amostragem das campanhas experimentais efetuadas, assim como os modelos da ficha de preparação de campanhas e da folha de registo dos ensaios experimentais, encontram-se no **Anexo I**.

Em suma, realizaram-se um total de 26 ensaios experimentais aos parafusos de Arquimedes instalados no sistema de elevação inicial das ETAR em caso.

4.2.5 CONDICIONANTES DOS ENSAIOS

Durante a realização dos ensaios *in situ* verificaram-se algumas dificuldades, nomeadamente o tempo que a sonda de OD leva em estabilizar a leitura, por vezes excedeu 1 e 2 minutos, dado à existência de turbulência causada pela queda de água residual, e/ou qualidade do afluente aos parafusos de Arquimedes, o que originavam alterações da concentração de oxigénio no líquido.

Salienta-se, ainda, que as medições nos dois locais de amostragem não foram executadas em simultâneo, ou seja, primeiro a montante dos parafusos de Arquimedes e só depois a jusante deste equipamento, com um intervalo de tempo de 5 a 10 minutos para o deslocamento da sonda de OD entre um ponto e outro, e iniciar o procedimento descrito no subcapítulo 4.2.3.

4.3 TRATAMENTO DE DADOS

O objetivo fulcral desta dissertação é desenvolver uma função para estimar a oxigenação da água residual, promovida pelo movimento do parafuso de Arquimedes, como já foi referido a priori na secção 1.2. Se tal for comprovado o aumento da concentração de OD na água residual (arejamento), recorrer-se-á a dois métodos estatísticos, denominados de regressão linear múltipla e regressão não linear.

• Regressão Linear Múltipla

A fim de analisar, a correlação referente às variáveis independentes (OD_m , Q , D , L) em relação à variável dependente, de acordo com o modelo da regressão linear múltipla, utilizou-se o seguinte (Equação 4.1):

$$OD_j = \beta_0 + \beta_1 OD_m + \beta_2 Q + \beta_3 D + \beta_4 L \quad (4.1)$$

onde:

OD_j - Concentração de oxigénio dissolvido na água residual a jusante dos parafusos de Arquimedes (mg/L);

OD_m - Concentração de oxigénio dissolvido na água residual a montante dos parafusos de Arquimedes (mg/L);

Q - Caudal da água residual transportada pelos parafusos de Arquimedes, registado aquando a realização dos ensaios experimentais a montante dos parafusos em causa (m^3/s);

D - Diâmetro unitário dos parafusos de Arquimedes (m);

L - Comprimento dos parafusos de Arquimedes (m).

Por último há que salientar que a determinação passará, então, pela estimativa do valor dos coeficientes, β_i , ficando posteriormente inalterados após a construção do modelo.

• Regressão Não Linear

Outra relação a analisar entre as variáveis é uma função exponencial, ou seja, aplicando a Equação (4.2):

$$OD_j = OD_m^{\beta_1} \times Q^{\beta_2} \times D^{\beta_3} \times L^{\beta_4} \quad (4.2)$$

Esta relação não linear, apresentada anteriormente na Equação (4.2), terá que ser transformada numa relação linear, passível de tratamento similar ao anterior. Assim, aplicam-se logaritmos de base 10, tal como se apresenta na Equação (4.3):

$$\log OD_j = \beta_0 + \beta_1 \log OD_m + \beta_2 \log Q + \beta_3 \log D + \beta_4 \log L \quad (4.3)$$

Contudo, os dados serão ajustados de acordo com o modelo da regressão linear múltipla. Pelo que, a determinação consiste em estimar o valor dos coeficientes, β_i .

5. CASOS DE ESTUDO

5.1 NOTA INTRODUTÓRIA

No capítulo 4 apresentou-se a metodologia das campanhas experimentais, além do procedimento para o tratamento de resultados, através das quais foram realizadas ensaios entre o início e o fim dos parafusos de Arquimedes instalados na elevação inicial das ETAR de Alcântara, Frielas e Bucelas. No entanto, em cada ETAR visitada, surgiram diferentes aspetos e dificuldades inerentes aos ensaios experimentais, sendo então apresentados neste capítulo, os quais são revelantes na determinação de valores fidedignos, pois de certa forma, comprometeram as medições.

O presente capítulo efetua uma breve descrição do processo de tratamento das ETAR visitadas, exploradas pela SIMTEJO, que atualmente integra a nova empresa ALVT. Além disso, é feita uma descrição do local da realização dos ensaios experimentais nestas estações de tratamento, ou seja, as instalações de bombagem inicial da água residual bruta por parafusos de Arquimedes.

5.2 CASO DE ESTUDO Nº 1 - ETAR DE ALCÂNTARA

5.2.1 DESCRIÇÃO GERAL

A ETAR de Alcântara situa-se na Avenida de Ceuta, em Alcântara, em Lisboa, serve parte dos municípios de Lisboa, Amadora e Oeiras, e iniciou-se em Dezembro de 1989, com o tratamento primário e desinfecção com cloro. A ETAR foi sujeita a obras de ampliação e modernização da instalação, tornando-se na maior ETAR coberta do país, com um jardim suspenso no telhado.

Desde 2009, dispõe de um tratamento secundário por biofiltração e desinfecção por UV, sendo capaz de servir 756 mil habitantes equivalentes. Inclui uma linha de tratamento para períodos de tempo húmido, com uma decantação primária avançada. O tratamento de lamas, com intuito de valorização agrícola, é constituído por espessamento, desidratação e estabilização

Esta ETAR subterrânea possui também um sistema de desodorização de toda a instalação, com a capacidade de tratar 160.000 m³/h de ar poluído.

5.2.2 PROCESSO DE TRATAMENTO

As operações e processos unitários que definem a linha de tratamento da fase líquida da ETAR de Alcântara são:

- Pré-tratamento
 - Remoção de sólidos de grandes dimensões através de um poço de grossos.
 - Gradagem, assegurada por gradagem grossa e tamisagem.

- Elevação inicial por ação de 4 parafusos de Arquimedes (3+1).
- Desarenamento/Desengorduramento.
- Tratamento primário
 - Em tempo seco, o caudal máximo é de 3,3 m³/s, a decantação primária é efetuada apenas por decantadores lamelares de tecnologia MultifloTM.
 - Em tempo húmido, o caudal excede os 3,3 m³/s, é ativa a linha de tratamento do tempo húmido, sendo o tratamento primário, além dos MultifloTM em funcionamento, efetuado pela tecnologia Actiflo®, onde são adicionados reagentes e micro-areia.
- Tratamento biológico, assegurado por 15 biofiltros BiostyrTM.
- Desinfecção por ação de lâmpadas UV, sendo o efluente final descarregado no rio Tejo.

A água residual tratada, ainda é reutilizada internamente e externamente, após uma desinfecção complementar, também por radiação UV.

Na linha da fase sólida, as lamas geradas nos tratamentos primário e secundário são submetidas aos seguintes processos:

- Espessamento gravítico
- Desidratação em centrífugas
- Estabilização química com adição de cal viva

5.2.3 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE AMOSTRAGEM

A sistema de elevação inicial de ETAR de Alcântara (Figura 13), local de amostragem, é constituído por 4 parafusos de Arquimedes (1+1 de reserva), cujo diâmetro unitário é 2500 mm e comprimento unitário é 16300 mm, sendo protegidos com gradagem a montante.



Figura 13 - Vista geral dos parafusos de Arquimedes, sem a cobertura, da ETAR de Alcântara
(Fonte: SIMTEJO - ETAR de Alcântara, Junho de 2015).

Além das condições normais de funcionamento, isto é, em tempo seco, os parafusos têm a capacidade de bombear o caudal adicional dos períodos de elevada precipitação, visto que esta ETAR possui uma linha de tratamento do tempo húmido.

A elevação inicial é efetuada em ambiente fechado, visto que a ETAR de Alcântara é uma infraestrutura subterrânea, contendo os parafusos uma cobertura, tal como ilustra a Figura 14.

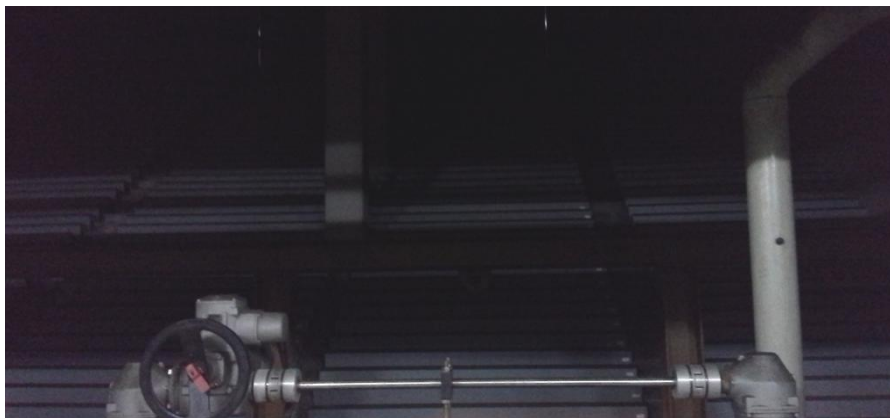


Figura 14 - Vista geral dos parafusos de Arquimedes, com cobertura, da ETAR de Alcântara.

As águas residuais são elevadas até uma cota superior (correspondente à cota de descarga), sendo então encaminhadas graviticamente para a etapa de desarenamento e desengorduramento, assim como para as restantes etapas que compõem a fase líquida da ETAR.

No **Anexo II** encontram-se as características técnicas referentes aos parafusos de Arquimedes da ETAR de Alcântara.

5.2.4 ASPETOS DAS CAMPANHAS DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS

As medições na ETAR de Alcântara foram efetuadas a partir de caixas de visitas situadas a montante e a jusante dos parafusos de Arquimedes, tal como ilustrado na Figura 15 e Figura 16, respetivamente.



Figura 15 - Caixa de visita localizada a montante dos parafusos de Arquimedes, na ETAR de Alcântara.



Figura 16 - Caixa de visita localizada a jusante dos parafusos de Arquimedes, na ETAR de Alcântara.

As condições de acesso aos locais de amostragem/medição, ou seja, as zonas situadas a montante e a jusante dos parafusos de Arquimedes instalados no sistema de bombagem inicial na ETAR de Alcântara, obrigaram à abertura e posterior fecho de tampas de caixas de visita de modo a colocar a sonda de OD para a execução das medições, com garantia de condições de segurança. Isto porque a zona de receção da água residual para elevação e o canal descarregador apresentam-se tapados com uma placa de betão.

5.3 CASO DE ESTUDO Nº 2 - ETAR DE BUCELAS

5.3.1 DESCRIÇÃO GERAL

A ETAR de Bucelas localiza-se no distrito de Lisboa, concelho de Loures e freguesia da Bucelas, entrou em funcionamento em Abril de 2004 e destina-se a tratar as águas residuais produzidas na zona noroeste de Loures e parte do município de Arruda dos Vinhos

Esta ETAR foi dimensionada para uma população equivalente de 15.000 habitantes o que corresponde a um caudal médio diário de cerca de $1575 \text{ m}^3/\text{dia}$. O processo de tratamento baseia-se num sistema por lamas ativadas na variante baixa carga, através duas linhas de tratamento com capacidade equivalente a 7.500 habitantes. Em 2009, entrou em serviço as etapas de filtração e de desinfecção do efluente final da ETAR. Porém, a água residual tratada é descarregada no rio Trancão, considerado zona sensível, e reutilizada no interior da instalação na rega e limpeza da órgãos.

As lamas em excesso geradas na ETAR de Bucelas estão estabilizadas, visto que o tratamento biológico é feito por lamas ativadas em regime de arejamento prolongado. Assim, o tratamento da fase sólida da ETAR é constituído pela unidade de desidratação das lamas.

5.3.2 PROCESSO DE TRATAMENTO

A linha de tratamento da fase líquida da ETAR de Bucelas é composta por:

- Pré-tratamento
 - Elevação inicial do afluente bruto através de 2 parafusos de Arquimedes (1+1).
 - Gradagem, equipada por um tamisador no canal principal e contém ainda um canal de *by-pass* adjacente com uma grade fixa de limpeza manual.
 - Desarenamento/Desengorduramento
- Tratamento biológico
 - 2 reatores biológicos do tipo valas de oxidação, equipados com sistema de arejamento mecânico.
 - 2 decantadores secundários de planta circular para a separação das lamas biológicas do efluente, sendo uma parte recirculada para montante das valas de oxidação. As lamas em excesso produzidas são envidadas para o tratamento da fase sólida.

- Tratamento terciário
 - Filtração, assegurada por 3 filtros em areia.
 - Desinfecção bacteriológica do efluente por ação da radiação ultravioleta.

O tratamento da fase sólida é constituído apenas por um sistema de desidratação mecânica, por filtro de banda, das lamas biológicas em excesso, posteriormente, armazenadas em contentor e enviadas para destino final.

5.3.3 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE AMOSTRAGEM

O local de amostragem situado na ETAR de Bucelas é composto por 2 parafusos de Arquimedes (1+1 de reserva) expostos ao ambiente atmosférico, isto é, em contato direto com o ar livre sem a existência de qualquer cobertura sob os parafusos de Arquimedes (Figura 17). Nesta instalação, cada parafuso de Arquimedes possui um diâmetro de 550 mm e um comprimento de 7350 mm.



Figura 17 - Vista geral dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas.

Os parafusos localizam-se à cabeça da estação de tratamento permitindo a elevação inicial da totalidade das águas residuais brutas afluentes à estação, bem como os retornos e escorrências resultantes do processo de tratamento da ETAR. O caudal elevado pelos parafusos de Arquimedes a céu aberto até à cota de descarga é então encaminhado graviticamente para a primeira etapa da gradagem, seguindo para outras operações e processos que constituem a linha de tratamento da fase líquida.

As características técnicas dos parafusos de Arquimedes da elevação inicial da ETAR de Bucelas apresentam-se no **Anexo II**.

5.3.4 ASPETOS DAS CAMPANHAS DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A ETAR de Bucelas, neste estudo, foi a única estação de tratamento que permitiu elaborar as medições em pontos muito próximos da entrada e da saída dos parafusos de Arquimedes (1+1), reunindo todas as condições de segurança, uma vez que é uma ETAR de pequena dimensão. A Figura 18 apresenta o poço de receção dos afluentes à ETAR para a bombagem inicial, isto é, a montante dos parafusos; e a Figura 19 mostra a zona de descarga da água residual bruta bombeada, ou seja, a jusante dos parafusos de Arquimedes.

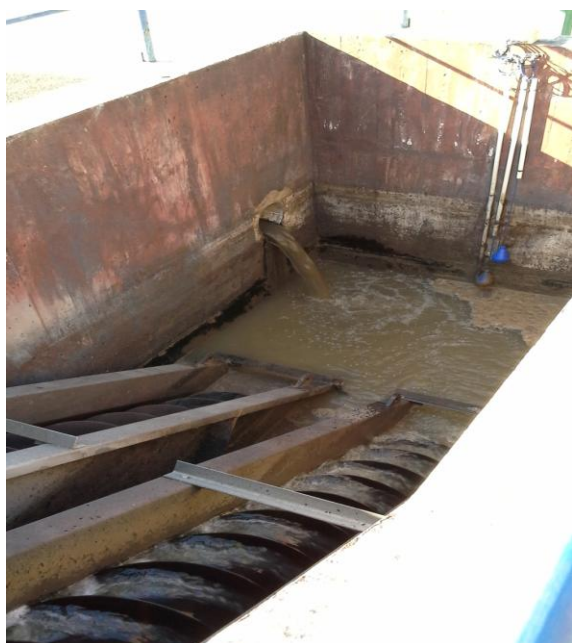


Figura 18 - Montante dos parafusos de Arquimedes, na ETAR de Bucelas.



Figura 19 - Jusante dos parafusos de Arquimedes, na ETAR de Bucelas.

A ETAR de Bucelas adota um sistema de tratamento de valas de oxidação de regime baixa carga, pelo que em algumas horas do dia, coincidentes com as horas da elaboração dos ensaios experimentais, a afluência de caudal é muito reduzida, em consequência, o nível do líquido é demasiado baixo, desta forma o poço de receção (Figura 10) apresentou-se quase vazio, obrigando assim a paragem dos parafusos de Arquimedes (1+1), considerando assim um cenário para avaliação da capacidade de oxigenação desta bomba. Assim sendo, quando o poço de receção se apresentou com o nível do líquido apto de proporcionar a paragem dos parafusos, iniciou-se a estimativa dos parâmetros de qualidade a jusante e só depois a montante, mas ainda assim, realizou-se medições durante a paragem dos parafusos em ambos os pontos de amostragem/medição mencionados, uma vez que demora algum tempo atingir o nível de arranque.

5.4 CASO DE ESTUDO Nº 3 - ETAR DE FRIELAS

5.4.1 DESCRIÇÃO GERAL

A ETAR de Frielas localiza-se na freguesia de Frielas, concelho de Loures e distrito de Lisboa e destina-se a tratar as águas residuais domésticas e industriais produzidas pelos municípios de Lisboa, Amadora, Loures, Odivelas e Vila Franca de Xira. Serve ainda uma parte das populações dos concelhos de Mafra e Sintra.

A ETAR iniciou-se no ano 1999 e foi concebida com o processo convencional de tratamento por lamas ativadas sem nitrificação, tratamento terciário por biofiltração e desinfecção por radiação UV, com a capacidade de tratar um caudal médio diário de 70.000 m³/dia, o que equivale a uma população de 300.000 habitantes equivalentes. O efluente final tratado é descarregado na ribeira da Póvoa, e reutilizado internamente e externamente para rega de espaços verdes e limpeza.

A linha de tratamento da fase sólida é constituída pelas etapas de espessamento, estabilização através da digestão anaeróbia e desidratação. Além disso, a digestão anaeróbia permite a produção de energia elétrica através da cogeração, consequentemente, reduz os custos de energia da ETAR

A ETAR em questão possui, ainda, o tratamento da fase gasosa, isto é, desodorização, nas zonas confinadas, pelo que são potencialmente produtoras de emissões de odores/maus cheiros.

5.4.2 PROCESSO DE TRATAMENTO

As principais operações e processos unitários existentes na linha de tratamento da fase líquida da ETAR de Frielas são:

- Pré-tratamento
 - Elevação inicial por dois estágios de parafusos de Arquimedes. O primeiro estágio contém 3 parafusos de Arquimedes (2+1) e o segundo estágio possui 4 (3+1).
 - Gradagem, assegurada por 4 grades grossas com limpeza por garra mecânica seguidas de um sistema de gradagem fina por 4 tamisadores do tipo *Step-Screen*.
 - Desarenamento/Desengorduramento, em tanques de planta retangular equipados por bombas de extração de areias. Dispõem ainda de injeção de ar a partir de difusores e ponte raspadora para raspagem superficial para a remoção de óleos e gorduras.
- Tratamento primário
 - Decantação primária, em 4 linhas, efetuada por tratamento físico-químico, através das injeção de coagulantes e floculantes, acoplado a decantação lamelar. As lamas primárias e químicas são encaminhadas os espessadores gravíticos.
 - Elevação intermédia por ação de parafusos de Arquimedes (3+1).
 - Equalização/Homogeneização, a partir de 3 tanques de equalização equipados com sistemas de mistura e arejamento

- Tratamento biológico
 - 6 tanques de arejamento concebidos em regime de fluxo pistão, pelo que cada tanque é bicompartimentado. Os reatores biológicos estão equipados por um sistema de difusores de disco (bolha fina), sendo o ar fornecido através de compressores.
 - Decantação secundária em 6 pares de decantadores secundários de planta retangular, em que parte das lamas biológicas constitui a recirculação aos tanques de arejamento. As lamas em excesso são extraídas para a flotação.
- Tratamento terciário
 - Elevação final para a biofiltração por ação de bombas centrífugas (2+1).
 - Biofiltração em 8 filtros biológicos BiostyrTM.
 - Desinfecção do efluente por radiação UV.

A linha da fase sólida tem as seguintes etapas:

- Espessamento gravítico das lamas primárias.
- Espessamento por flotação das lamas secundárias (biológicas).
- Mistura de lamas primárias e secundárias.
- Estabilização biológica das lamas mistas por digestão anaeróbia aquecida.
- Desidratação efetuada por via mecânica em centrífugas.
- Armazenamento das lamas desidratadas em silos e encaminhadas para destino final.

5.4.3 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE AMOSTRAGEM

A elevação inicial de águas residuais na ETAR de Frielas realiza-se por ação de parafusos de Arquimedes em dois estágios de elevação. O primeiro estágio de elevação inicial é subterrâneo e inclui 3 parafusos de Arquimedes (2+1 de reserva) e o segundo possui 4 parafusos (3+1 de reserva), dispostos ao ar livre com cobertura.

Neste caso, as medições dos parâmetros nesta ETAR apenas decorreram a montante e jusante do segundo estágio de elevação inicial (Figura 20), pois o primeiro estágio é subterrâneo de difícil acesso e, consequentemente, não apresenta condições de segurança, sobretudo, para medir os parâmetros na água residual afluente ao primeiro estágio.



Figura 20 - Vista geral do 2º estágio de elevação inicial da ETAR de Frielas.

Cada parafuso do 2º estágio contém um diâmetro de 1650 mm e um comprimento de 9843 mm. As restantes características técnicas dos parafusos de Arquimedes instalados no 2º estágio de elevação inicial de águas residuais na ETAR de Frielas encontram-se no **Anexo II**.

Esta estação de bombagem inicial possui a entrada de vários efluentes à entrada e à saída de cada estágio de elevação. A Figura 21 apresenta o esquema da água residual bruta afluenta à ETAR de Frielas. Ao 1º estágio chegam, de forma gravítica, as águas residuais provenientes do coletor de Frielas e do coletor do Parque Industrial. Os afluentes elevados pelo 1º estágio prosseguem então para o 2º estágio assim como os efluentes oriundos do coletor Rio da Costa e do coletor P, também chegam de forma gravítica.

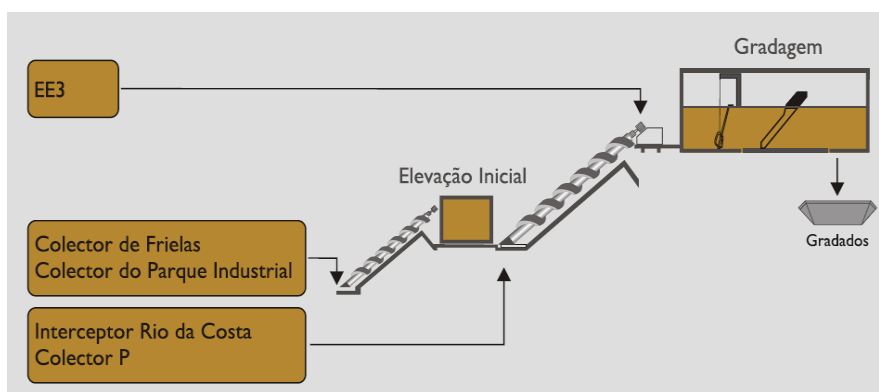


Figura 21 - Esquema da elevação inicial da ETAR de Frielas (Fonte: SIMTEJO - ETAR de Frielas, Junho de 2015).

Ainda na Figura 21, imediatamente a jusante da elevação inicial através de parafusos de Arquimedes, o efluente proveniente da Estação Elevatória (EE3) é enviado por bombagem para o canal de repartição da gradagem.

As águas residuais são reunidas, a partir do canal de repartição da gradagem. O escoamento é gravítico ao longo da gradagem, canal *Parshall*, desarenamento/desengorduramento, coagulação/floculação e decantadores primários. Ou seja, as águas residuais são encaminhadas graviticamente para a linha de tratamento da fase líquida até ao final do tratamento primário.

5.4.4 ASPETOS DAS CAMPANHAS DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A realização dos ensaios experimentais no sistema de elevação inicial de águas residuais na ETAR de Frielas, nomeadamente, no 2º estágio de elevação inicial, foi imprescindível colocar a sonda de OD numa caixa de visita localizada a montante do 2º estágio de parafusos da elevação inicial. Como tal, procedeu-se à abertura e depois fecho da tampa da caixa visita, apresentada na Figura 22.



Figura 22 - Caixa de visita localizada a montante do 2º estágio de parafusos de Arquimedes da elevação inicial, na ETAR de Frielas.

Além disso, o acesso à caixa, apresentada na Figura 21 anterior, foi feito através de uma escada vertical fixa (de cor amarela).

Relativamente à zona de montante da elevação inicial, as águas residuais após os parafusos de Arquimedes são descarregadas no canal de repartição da gradagem (Figura 23). O canal descarregador é aberto e, por isso, a sonda de OD foi mergulhada diretamente no líquido.



Figura 23 - Jusante dos parafusos de Arquimedes da elevação inicial, na ETAR de Frielas.

A dificuldade denotada nas medições no canal de repartição da gradagem, nomeadamente durante a 1ª campanha, foi o tempo de espera da estabilização da sonda de OD, a entrada do efluente proveniente da EE3 interferiu na qualidade dos dados de OD, tal como explicado anteriormente. Por isso, na 2ª campanha houve necessidade de executar as medições num ponto próximo e outro

afastado da descarga do efluente da EE3. As Figuras 24 e 25 apresentam, a título ilustrativo, a zona dos pontos de medição no canal de repartição da gradagem.



Figura 24 - Ponto próximo da entrada do efluente da EE3, na ETAR de Frielas.



Figura 25 - Ponto afastado da entrada do efluente da EE3, na ETAR de Frielas.

Estes pontos definidos na 2ª campanha, mostraram que a localização na entrada do efluente da EE3, imediatamente a jusante da elevação por parafusos, influenciaram o valor da concentração de OD, como será demonstrado no Capítulo 6.

5.5 RESUMO DOS FACTORES DOS CASOS DE ESTUDO

Em resumo, apresenta-se na Tabela 2, o tipo de instalação e as dimensões dos parafusos de Arquimedes, instalados no sistema de elevação inicial de água residual das ETAR visitadas, sendo informação que, em princípio, influenciará na eficiência dos parafusos no arejamento da água residual, se existir esta capacidade extra.

Tabela 2 - Resumo dos sistemas de elevação inicial de água residual dos casos de estudo.

Designação da ETAR	Tipo de instalação dos parafusos de Arquimedes	Dimensões dos parafusos de Arquimedes		Caudal máximo
		D (m)	L (m)	l/s
ETAR de Alcântara	Subterrânea, com cobertura	2,5	16,3	2200
ETAR de Bucelas	A céu aberto, sem cobertura	0,55	7,35	36
ETAR de Frielas	A céu aberto, com cobertura (2º estágio de elevação inicial)	1,65	9,843	534

6. EXPLORAÇÃO DE RESULTADOS

6.1 NOTA INTRODUTÓRIA

Após apresentação detalhada da metodologia utilizada para obtenção de dados reais, a exposição do procedimento para o tratamento de resultados e a caracterização dos locais de amostragem/medição de cada caso de estudo, passa-se, agora, à apresentação dos resultados, obtidos nas campanhas de medições.

Este capítulo está dividido em dois subcapítulos. O primeiro dedica-se à descrição e análise dos dados relativos aos parâmetros medidos nas campanhas de ensaios experimentais, e, por fim, no segundo subcapítulo descreve-se e justifica-se a determinação da função que relacionará os vários parâmetros medidos e dimensões dos parafusos de Arquimedes, utilizados no trabalho empírico da dissertação.

6.2 ANÁLISE INDIVIDUAL DOS DADOS

Numa primeira fase, confirmou-se se existência ou não, de aumento da concentração de oxigénio dissolvido e, posteriormente, avaliou-se a eficiência de rearejamento, para cada conjunto de parafusos de Arquimedes instalados no sistema de elevação inicial das ETAR visitadas.

Como tal, na Tabela 3 e Tabela 4, apresentam-se, para ambas as campanhas experimentais, os valores das concentrações de OD a montante e a jusante dos parafusos de Arquimedes, bem como a eficiência de rearejamento dos mesmos.

Tabela 3 - Valores obtidos de OD_m, OD_j e E20, na 1ª campanha experimental.

Instalação	OD _m (mg/L)			OD _j (mg/L)			E20		
	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
ETAR de Alcântara	1,53	2,36	1,95	4,80	5,34	5,00	0,61	0,92	0,77
ETAR de Frielas	0,28	5,15	2,06	1,55	2,70	1,99	0,06	0,36	0,14
ETAR de Bucelas	0,03	6,32	1,60	2,34	5,94	4,22	0,05	1,59	0,69

Através da análise da Tabela 3, constata-se que os parafusos de Arquimedes instalados na elevação inicial na ETAR de Alcântara e na ETAR de Bucelas, revelaram ser os mais eficientes em arejar a água residual bombeada. Visto que, em média, na 1ª campanha experimental, as ETAR de Alcântara

e Bucelas obtiveram aumento da concentração de OD, respetivamente, igual a 3,05 mg/L e 2,62 mg/L.

Relativamente aos parafusos do 2º estágio de elevação inicial da ETAR de Frielas, na 1ª campanha de ensaios, não manifestaram aumento do teor de OD, pelo que, em média, houve um decréscimo de 0,07 mg/L.

Tabela 4 - Valores obtidos de OD_m, OD_j e E20, na 2ª campanha experimental.

Instalação	OD _m (mg/L)			OD _j (mg/L)			E20		
	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
ETAR de Alcântara	0,24	1,56	0,77	4,03	4,76	4,44	0,55	0,98	0,82
ETAR de Frielas	0,10	1,59	0,67	0,95	3,06	1,98	0,08	0,32	0,21
ETAR de Bucelas	1,83	5,12	4,09	5,72	8,16	6,65	0,23	0,89	0,52

Pela observação da Tabela 4, verifica-se que, na 2ª campanha de ensaios, os parafusos de Arquimedes das ETAR visitadas aumentaram o valor de OD na água residual, da zona de montante para jusante. Assim, em média, nas ETAR de Alcântara, Frielas e Bucelas o aumento do teor de OD foi igual a 3,67 mg/L, 1,31 mg/L e 2,56 mg/L, respetivamente.

Em seguida, neste subcapítulo, analisa-se a evolução dos parâmetros recolhidos em cada instalação, de modo a compreender o efeito do movimento dos diferentes parafusos de Arquimedes, usados no trabalho empírico, no arejamento da água residual.

Assim, os resultados dos ensaios experimentais aos parafusos de Arquimedes são apresentados sob a forma de representação gráfica para uma melhor perceção da variação dados obtidos, normalizados entre 0 e 1, em relação ao valor máximo de cada parâmetro medido. Contudo, no **Anexo III**, apresentam-se os resultados sob a forma de tabelas numéricas.

• ETAR de Alcântara

No dia 17 de Abril de 2015 foi realizado o primeiro ensaio experimental nos parafusos de Arquimedes instalados na Obra de Entrada da ETAR de Alcântara. Os resultados do primeiro ensaio revelaram que o movimento dos parafusos de Arquimedes, contribui significativamente para o aumento da concentração de oxigénio dissolvido no escoamento, tal como seria de esperar, por se tratarem dos parafusos de maiores dimensões, relativamente, aos parafusos dos outros casos de estudo. Em média, da zona de montante para jusante, o valor médio de OD aumenta de 1,95 mg/L para 5,00 mg/L, respetivamente. Assim sendo, a eficiência de rearejamento à temperatura de 20 °C, E₂₀, variou entre 0,60 e 0,93, o que significa que a transferência de oxigénio para a água residual, gerada pela

turbulência, provocada pelo movimento do parafuso de Arquimedes, foi próxima do valor de saturação de OD. Contudo, a concentração é inferior à saturação, por isso o oxigênio existente no ar passa para a água residual de forma proporcional à diferença em relação ao valor de saturação.

Na Figura 26 e Figura 27, apresentam-se a evolução dos parâmetros medidos na primeira campanha experimental, ou seja, a concentração de OD, temperatura da água residual e caudal, em função do intervalo de tempo das medições, a montante e a jusante dos parafusos de Arquimedes, respetivamente.

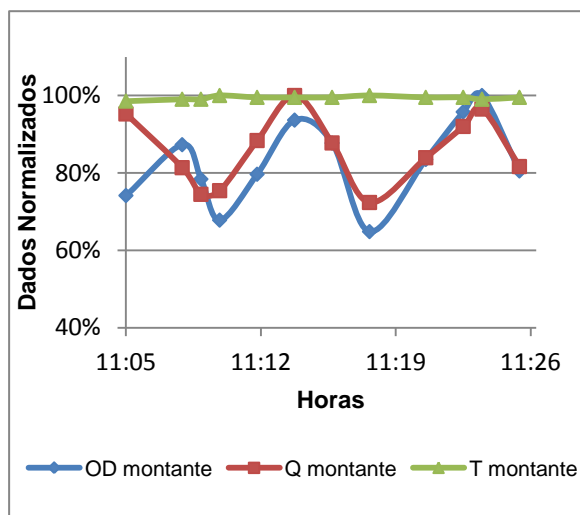


Figura 26 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Alcântara (17/04/2015).

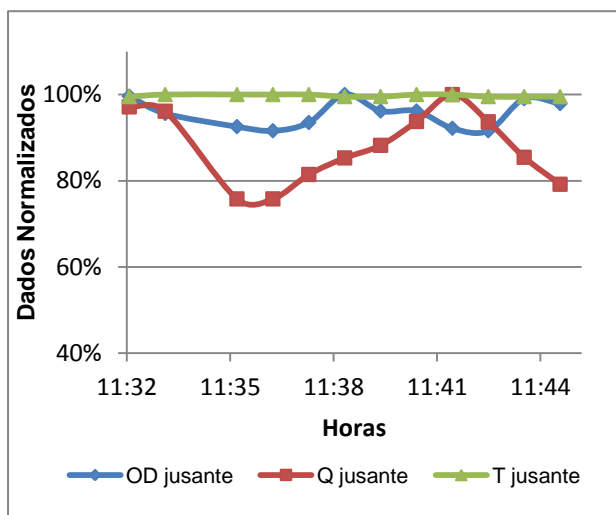


Figura 27 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Alcântara (17/04/2015).

Da análise da Figura 26, afigura-se que os valores de concentração de OD e caudal, no afluente durante o período de medição, variam de forma idêntica, ou seja, quando o caudal aumenta; o valor de OD também aumenta, e vice-versa. Tal como previsto, o aumento de caudal, reduz ligeiramente a carga orgânica e aumenta a consequente quantidade de OD. Enquanto, no efluente, o caudal variou ligeiramente e teor de OD manteve-se quase constante, durante o tempo de medição, tal como se pode observar na Figura 27. Porém, o valor da temperatura da água residual, tanto no afluente como no efluente, foi constante e na ordem dos 20,8 °C.

A 2ª campanha, realizada a 11 de Setembro de 2015, tal como esperado, os resultados obtidos mostram, que os parafusos de Arquimedes da estação de tratamento de Alcântara têm uma enorme capacidade de arejar a água residual transportada, isto é, aumentar o nível de OD a jusante dos parafusos em causa. A concentração média de OD a montante e a jusante dos parafusos de Arquimedes foi 0,77 mg/L e 4,44 mg/L, respetivamente. Contudo, os valores de concentração de OD reduziram em relação à 1ª campanha, tanto a montante como a jusante, pois a temperatura da água residual foi quase mais 4°C, relativamente à 1ª campanha. A E20 variou entre 0,55 e 0,98, pelo que, a

transferência de oxigênio foi próxima do valor de saturação. Porém, o oxigênio presente no ar é transferido para a massa de líquido de modo proporcional à pequena diferença entre a concentração em relação à saturação.

As Figuras 28, 29, 30 e 31 ilustram a variação dos parâmetros medidos na 2ª campanha ao longo do tempo de medição.

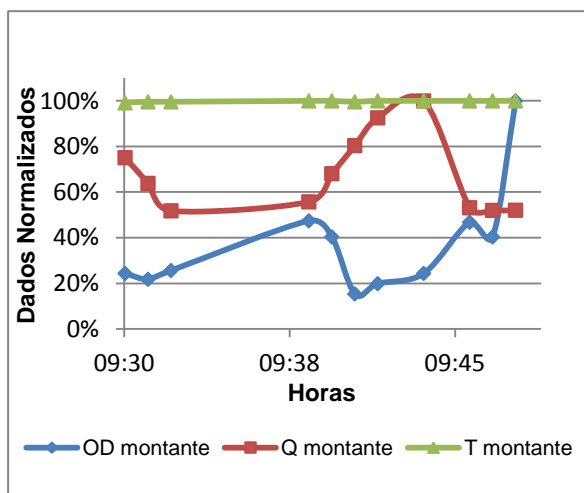


Figura 28 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Alcântara (1º ensaio de 11/09/2015).

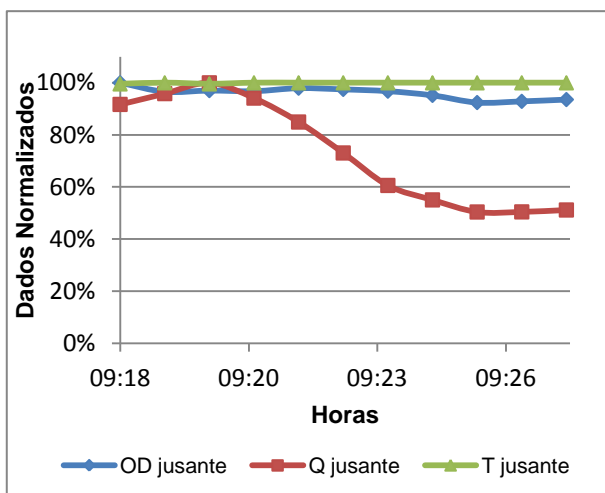


Figura 29 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Alcântara (1º ensaio de 11/09/2015).

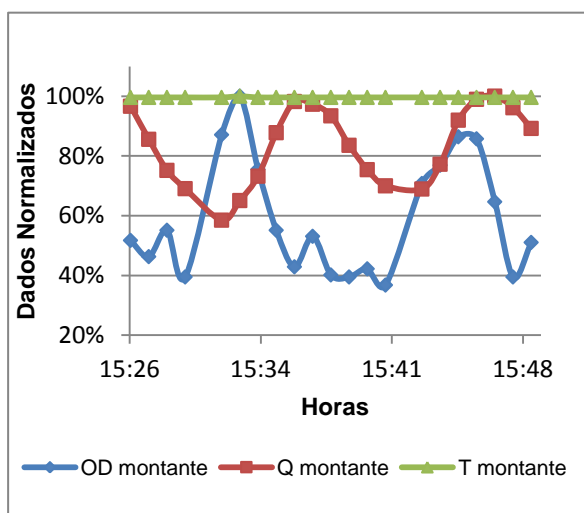


Figura 30 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Alcântara (2º ensaio de 11/09/2015).

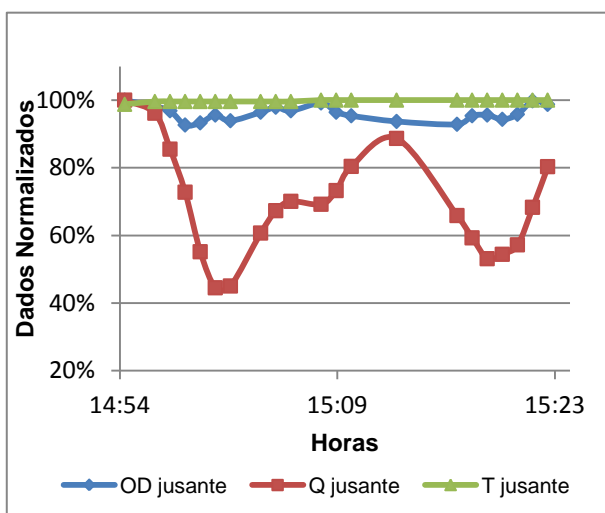


Figura 31 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Alcântara (2º ensaio de 11/09/2015).

Após a análise das Figura 28 e Figura 30, ao longo do tempo da realização dos ensaios, a temperatura da água residual foi estável, tomando um valor médio de 23,7 °C no 1º ensaio e 24,1°C no 2º ensaio. A evolução do nível de OD e do caudal, no 1º ensaio, foi simétrica, não sendo esperado. No 2º ensaio, a concentração de OD progrediu ao longo do tempo de forma alternada, quase de forma idêntica à evolução do caudal.

Conforme se pode observar nos gráficos das Figuras 29 e Figura 31, no efluente dos parafusos, a concentração de OD é constante, sendo, aproximadamente, 4,19 mg/L no 1º ensaio e 4,58 mg/L no 2º ensaio. Outro parâmetro com comportamento constante, é a temperatura da massa líquida, que foi 23,6 °C no 1º ensaio e 24,1°C no 2º ensaio. O caudal, no 1º ensaio, revelou um aumento até ao minuto 2 e depois um decréscimo até ao final da medição. No 2º ensaio, o caudal variou alternadamente.

Os parafusos de Arquimedes instalados na elevação inicial de Alcântara, visto que, entre os casos de estudo, são os de maiores dimensões, permitem um grande aumento da área de interface entre a água residual transportada e a atmosfera circundante. Em consequência, a transferência de oxigénio será maior, pelo que, estes parafusos captam mais oxigénio.

• ETAR de Bucelas

Os dados obtidos na 1ª campanha experimental, efetuada no dia 02 de Julho de 2015, mostram que os parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas têm grande capacidade de elevar a concentração de OD. Assim, os teores de OD a montante e a jusante dos parafusos apresentaram valores médios de 1,60 mg/L e 4,22 mg/L, respetivamente.

Porém, a qualidade do afluente à bombagem inicial alterou no final da 1ª campanha, ou seja, entre as 11h04 e 17h53, apresentou valores de concentração de OD da ordem dos 0,55 mg/L, e das 17h57 até às 18h05, este valor aumentou para cerca de 5,50 mg/L. Consequentemente, a E20 variou entre 0,05 e 1,59. Atingiu valores próximos de zero, pois a concentração de OD no afluente e efluente tomam valores muito próximos, ou seja, não existe transferência de oxigénio. O afluente quando ausente de OD, atingiu valores de eficiência de rearejamento superiores a 1, o que significa que a transferência de oxigénio que ocorreu no parafuso de Arquimedes atingiu o valor de saturação em OD ($E_{20}=1$), e por vezes excedeu ($E_{20}>1$). Quando excedeu o valor de saturação, o efluente aos parafusos encontrou-se sobressaturado, o oxigénio em parte passa para a atmosfera.

Da Figura 32 à Figura 37 são apresentados os resultados da determinação da concentração de OD, caudal e temperatura da água residual em função do tempo da realização das medições.

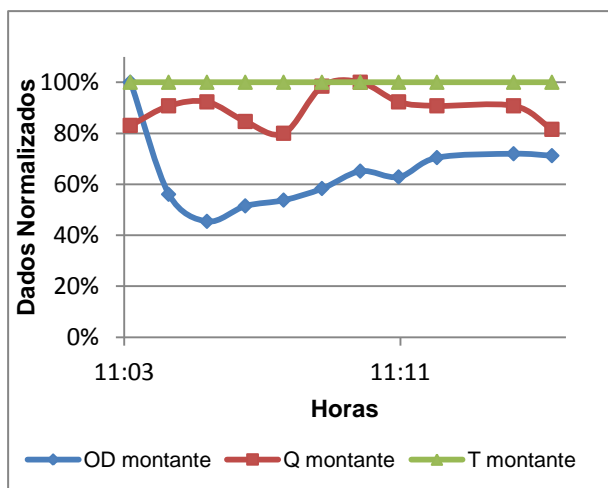


Figura 32 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (1º ensaio de 02/07/2015).

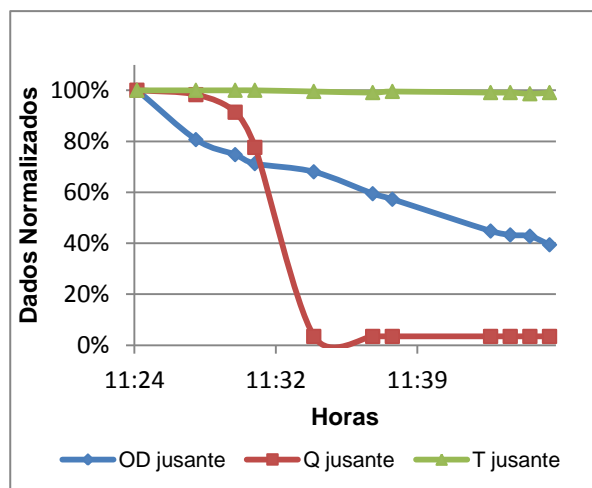


Figura 33 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (1º ensaio de 02/07/2015).

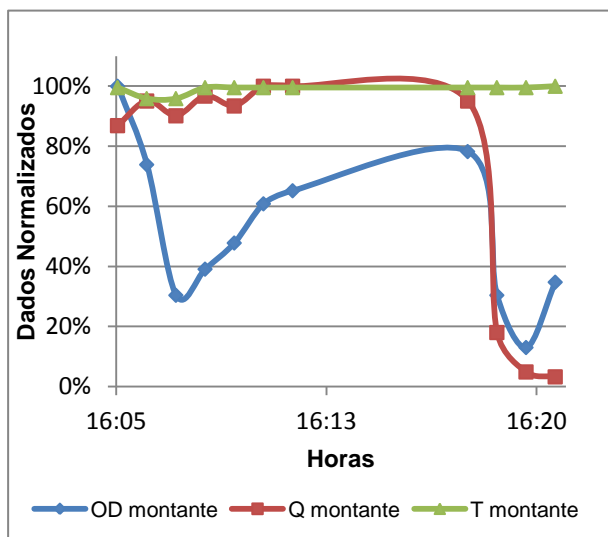


Figura 34 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (2º ensaio de 02/07/2015).

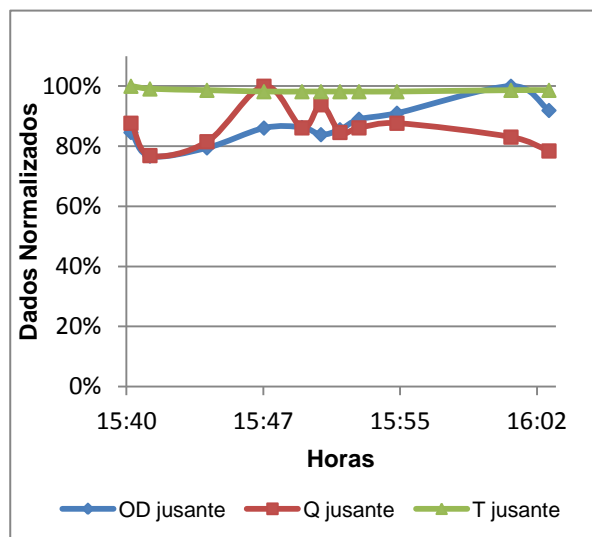


Figura 35 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (2º ensaio de 02/07/2015).

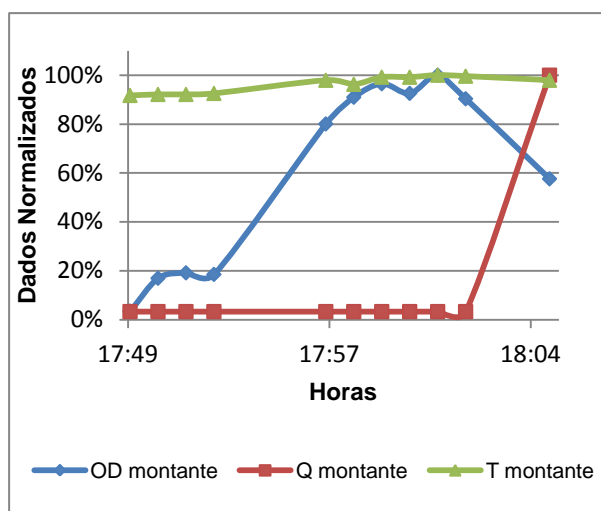


Figura 36 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (3º ensaio de 02/07/2015).

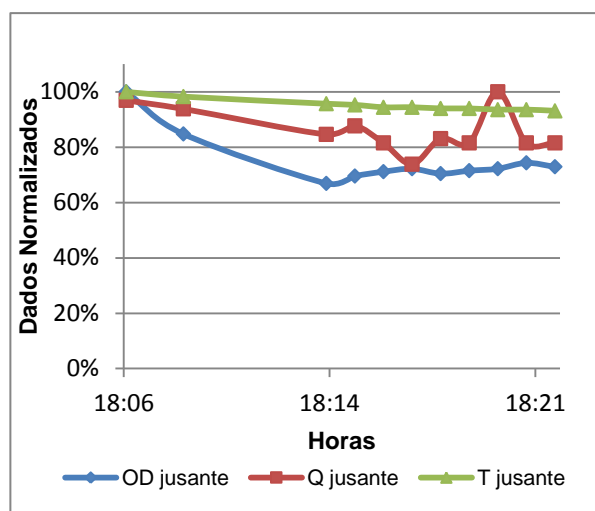


Figura 37 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (3º ensaio de 02/07/2015).

Analisando a evolução dos parâmetros ao longo do tempo, a montante dos parafusos, nas Figuras 32 e 34, em geral, a evolução do valor do teor de OD é semelhante ao do caudal. No gráfico da Figura 36, embora o valor caudal seja mínimo, o valor de OD aumentou e reduziu no último minuto de medição, pois do mínimo 7 até ao minuto 15, ou seja das 17h57 até às 18h05, os valores de OD aumentaram em média para 5,50 mg/L, tal como mencionado anteriormente. Além disso, durante o período desta medição, observa-se um ligeiro aumento da temperatura da água residual, de cerca de 22,2 °C para 24,0 °C. A súbita variação da qualidade do afluente, deveu-se à descarga de retornos do processo de tratamento, além da água residual que chega à estação.

A jusante da elevação inicial, verifica-se alguma estabilidade da concentração de OD e do caudal, exceto na primeira medição (Figura 33), devido à paragem dos parafusos por o caudal do afluente à ETAR ser tão reduzido, denotou-se um decréscimo sucessivo do teor de OD, de 5,94 mg/L para 2,34 mg/L. Por outra lado, observa-se nas Figuras 35 e 37, que o teor de OD e o caudal possuem uma evolução constante. No caso, da Figura 37, a temperatura da água residual decresce ligeiramente, notando-se um aumento da concentração de OD, tal como esperado.

Contudo, ao longo do 1º e 2º ensaio, a temperatura da água residual não sofreu alterações durante o tempo de medição, tomando valores da ordem dos 21,8 °C.

Na 2ª campanha de ensaios, realizada a 19 de Agosto de 2015, os resultados mostram o aumento da concentração de oxigénio, mas a concentração de OD foi, em média, cerca de 2,28 mg/L e 4,95 mg/L no 1º ensaio e 2º ensaio, respetivamente. Quanto ao efluente, em média, a concentração de OD foi, aproximadamente, 7,08 mg/L no 1º ensaio e 6,42 mg/L no 2º ensaio, pelo foram valores superiores aos da 1ª campanha. Consequentemente, os valores eficiência de rearejamento, através da interface ar/água residual, variaram entre 0,2 e 0,9, pode-se afirmar que quantidade de OD na água residual, é

inferior ao valor de saturação, logo, o oxigênio atmosférico é transferido para a água residual proporcionalmente à discrepância em relação à saturação.

Quanto ao comportamento dos parâmetros medidos, da Figura 38 à Figura 41, apresentam-se graficamente a evolução da concentração de OD, caudal e temperatura da água residual em função do tempo de medição.

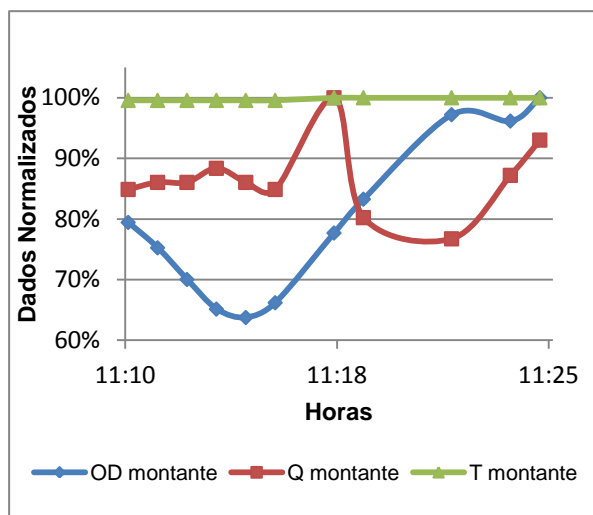


Figura 38 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (1º ensaio de 19/08/2015).

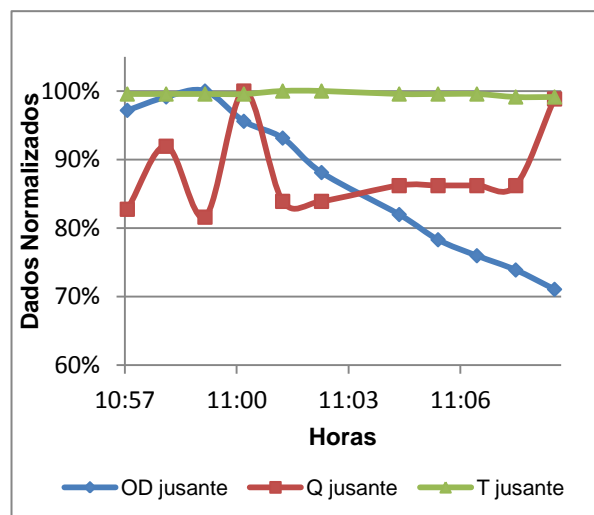


Figura 39 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (1º ensaio de 19/08/2015).

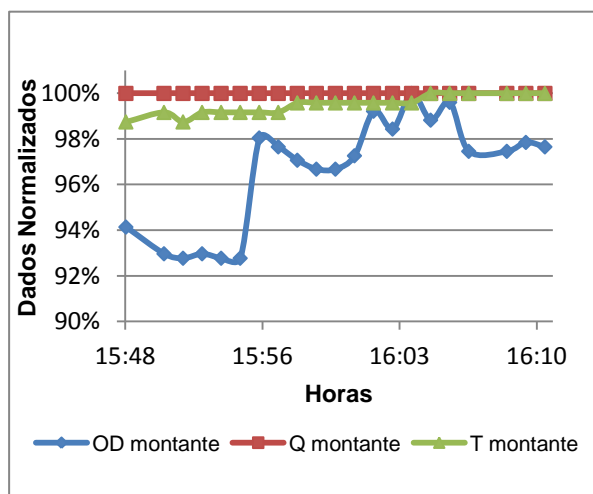


Figura 40 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (2º ensaio de 19/08/2015).

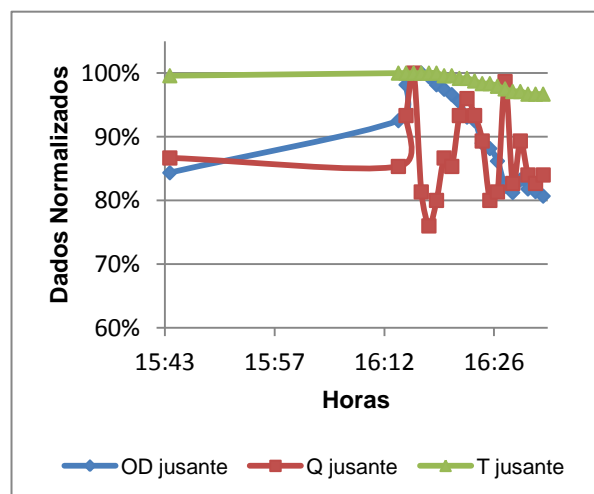


Figura 41 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante dos parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas (2º ensaio de 19/08/2015).

Observando os dados obtidos no afluente do primeiro ensaio (Figura 38), os valores de OD e caudal variaram alternadamente, mas não evoluíram da mesma forma. No efluente do 1º ensaio (Figura 39), a concentração de OD decresceu ligeiramente de 7,93 mg/L para 5,80 mg/L. Em ambos, a temperatura na água residual foi constante em torno dos 22,8 °C e 23,0 °C, no 1º e 2º ensaio, respetivamente.

Relativamente ao 2º ensaio, no afluente (Figura 40), a concentração de OD evoluiu alternadamente, entre 4,75 mg/L e 5,12 mg/L, para um caudal de 2 m³/h que permaneceu constante. Porém a temperatura da água aumenta gradualmente de 23,7 °C para 24,0 °C, não sendo perceptível o efeito aumento de temperatura sobre a concentração de OD.

No efluente do 2º ensaio (Figura 41), após o arranque dos parafusos, a concentração de OD atingiu os valores altos, obteve valores de cerca de 7,09 mg/L, mas reduziu durante o ensaio, para 5,72 mg/L. Tal ocorreu, pois a concentração de OD no efluente dos parafusos de Arquimedes, nesta estação de tratamento, geralmente, atinge valores altos que variam entre 4,00 mg/L e 6,00 mg/L, correspondendo a uma gama de concentração suportável. Quando atinge valores acima, entre 8,00 mg/L e 7,00 mg/L, reduz para a gama suportável.

Contudo, ainda no 2º ensaio, a jusante da bombagem inicial, o caudal variou bastante, entre 57 m³/h e 75 m³/h e a temperatura reduziu linearmente de 24,1°C para 23,4 °C, não sendo compreensível qualquer efeito destes parâmetros sobre a concentração de oxigénio dissolvido.

Embora, os parafusos de Arquimedes da ETAR de Bucelas sejam de pequena dimensão, relativamente aos outros parafusos dos casos de estudos, estão instalados a céu aberto, deste modo, a água residual transportada estará em contacto direto com o ar atmosférico, logo a transferência de oxigénio é aumentada. Assim, a jusante dos parafusos de Arquimedes a concentração de OD possui valores altos, iguais e superiores aos parafusos com maiores dimensões, ou seja, os parafusos instalados em Alcântara.

• ETAR de Frielas

Os resultados da 1ª campanha, realizada no dia 02 de Julho de 2015, mostram que o 2º estágio de parafusos da elevação inicial da ETAR de Frielas provocaram um ligeiro aumento da concentração de OD, e em algumas medições, o teor de OD no afluente foi igual e/ou bastante superior ao do efluente. Em média, a concentração de OD no afluente variou entre 0,28 mg/L e 5,15 mg/L, e no efluente variou entre 1,55 mg/L e 2,70 mg/L.

Deste modo, a E20 obteve valores entre 0,06 e 0,36, ou seja, próximos de zero, pelo que, corresponde, aproximadamente, à inexistência de transferência de oxigénio para água residual. Esta situação justifica-se, como referido na secção 5.5.3, pela descarga do efluente da EE3 imediatamente a jusante do 2º estágio de elevação inicial, reduzindo assim a concentração de OD no efluente dos parafusos de Arquimedes.

A evolução dos valores de OD, temperatura e caudal ao longo do intervalo de tempo de medição, obtidos nos três ensaios efetuados a 02 de Junho, pode-se observar em seguida, da Figura 42 à Figura 47, tanto no afluente como no efluente.

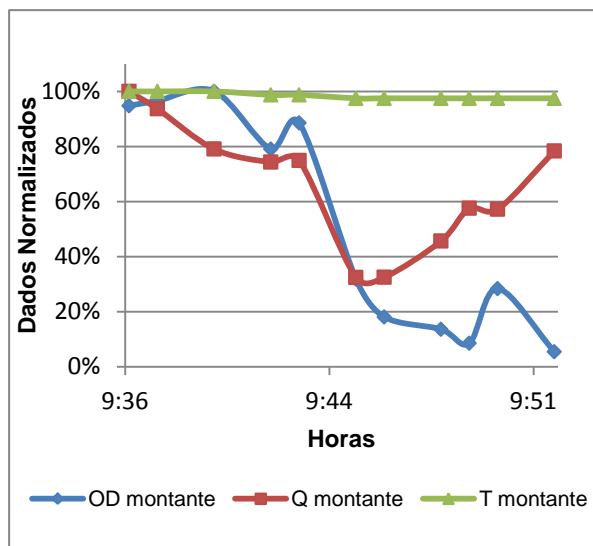


Figura 42 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante do 2º estágio de elevação inicial, na ETAR de Frielas (1º ensaio de 02/07/2015).

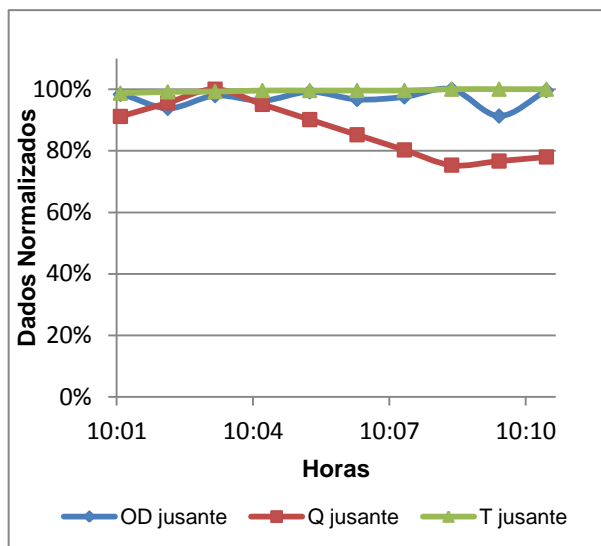


Figura 43 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante do 2º estágio de elevação inicial, na ETAR de Frielas (1º ensaio de 02/07/2015).

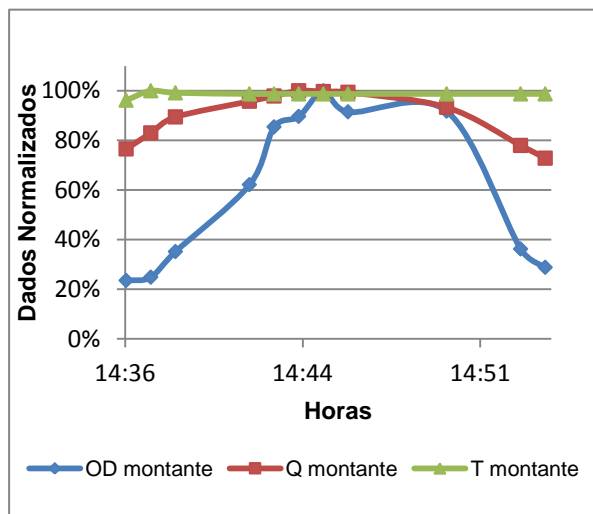


Figura 44 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante do 2º estágio de elevação inicial, na ETAR de Frielas (2º ensaio de 02/07/2015).

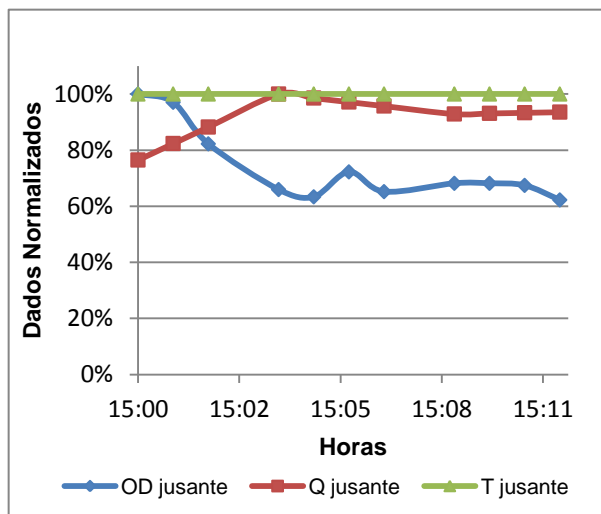


Figura 45 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante do 2º estágio de elevação inicial, na ETAR de Frielas (2º ensaio de 02/07/2015).

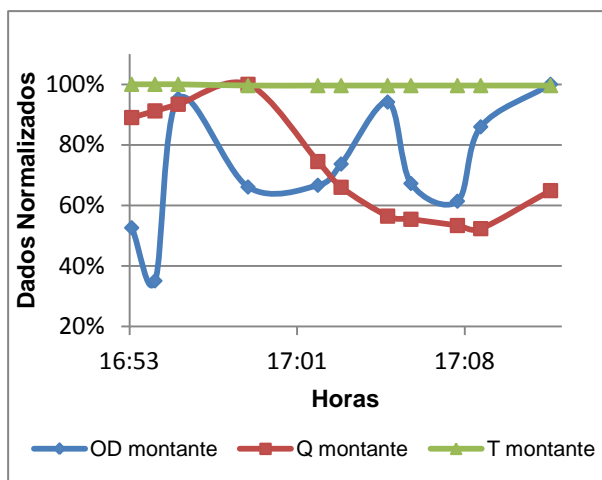


Figura 46 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante do 2º estágio de elevação inicial, na ETAR de Frielas (3º ensaio de 02/07/2015).

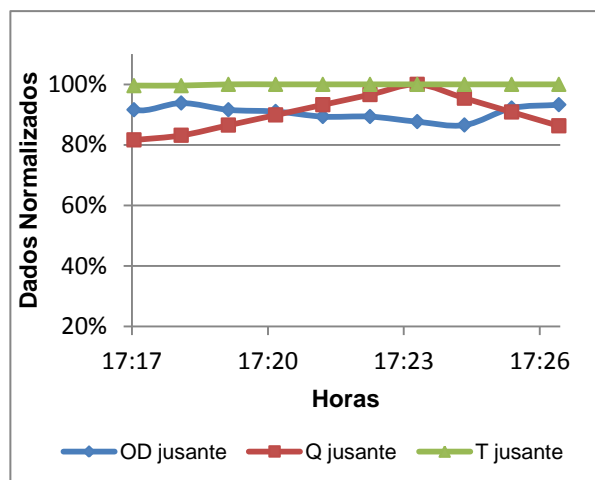


Figura 47 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante do 2º estágio de elevação inicial, na ETAR de Frielas (3º ensaio de 02/07/2015).

A análise dos gráficos mostra que a evolução da temperatura da água residual tal manteve-se constante durante o intervalo de tempo das medições, no afluente e efluente dos parafusos de Arquimedes, na ordem dos 23,3 °C. Por outro lado, os dados de OD e caudal variaram ao longo do tempo de medição.

Pelas Figuras 42 e 44, verificou-se que a concentração de OD no afluente evoluiu de forma semelhante ao caudal, assim como esperado, porque o aumento de caudal aumenta conduz ao aumento da quantidade de OD na água residual, como mencionado anteriormente. Enquanto, que a Figura 46 mostrou instabilidade do valor de OD, não acompanhando a evolução de caudal no afluente, estando associado à qualidade do afluente que chega ao 2º estágio de elevação inicial. De acordo com o descrito no subcapítulo 5.3.3, além dos afluentes provenientes do 1º estágio de elevação inicial com algum nível de OD, chegam também os afluentes provenientes do coletor Rio da Costa e do coletor P, possuem baixas concentrações de OD, sendo uma zona de mistura dos três afluentes à estação, então, os teores de oxigénio dissolvido, o que causa oscilações no OD, tal como aconteceu.

Quanto ao efluente, observando as Figuras 43, 45 e 47, a concentração de OD e o caudal evoluíram, maioritariamente, de forma constante, com pequenas alterações, provavelmente, o movimento dos parafusos de Arquimedes, terá a capacidade de homogeneizar.

A segunda campanha, realizada no dia 19 de Agosto de 2015, comprovou, mais uma vez, que o efluente da elevação inicial não possui uma pequena concentração de OD em relação ao afluente do segundo estágio de elevação, tal como referido anteriormente, devido à entrada do efluente da EE3. Mas, a concentração de oxigénio dissolvido no afluente, em média, varia entre 0,10 mg/L e 1,59 mg/L, e no efluente, em média, varia entre 0,95 mg/L e 3,06 mg/L.

Por esta razão, a E20 variou entre 0,1 e 0,3, o que prova que a transferência de oxigênio para a água residual é relativamente baixa. Das Figuras 48 à Figura 51 apresentam-se os resultados experimentais da concentração de OD, temperatura e caudal em função do tempo da medição.

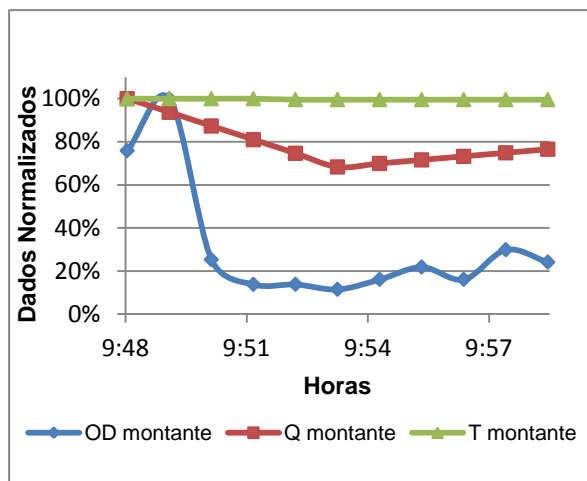


Figura 48 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante do 2º estágio da elevação inicial, na ETAR de Frielas (1º ensaio de 19/08/2015).

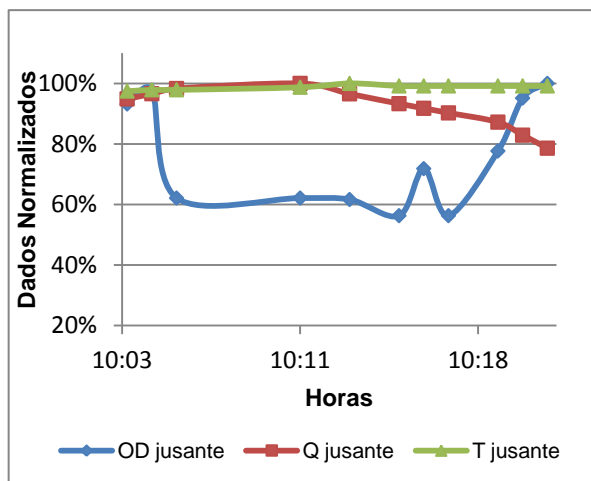


Figura 49 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante do 2º estágio da elevação inicial, na ETAR de Frielas (1º ensaio de 19/08/2015).

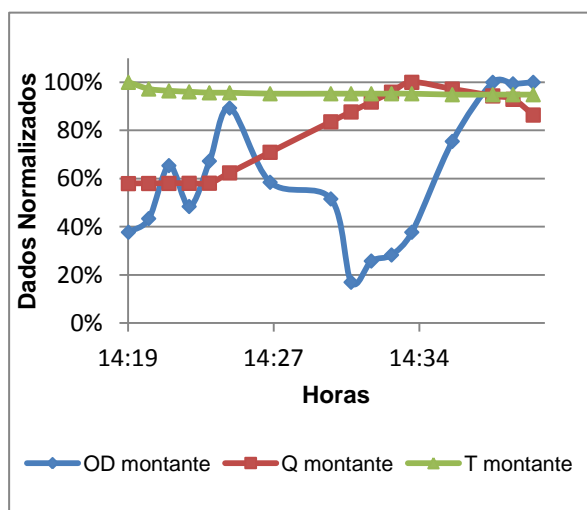


Figura 50 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a montante do 2º estágio da elevação inicial, na ETAR de Frielas (1º ensaio de 19/08/2015).

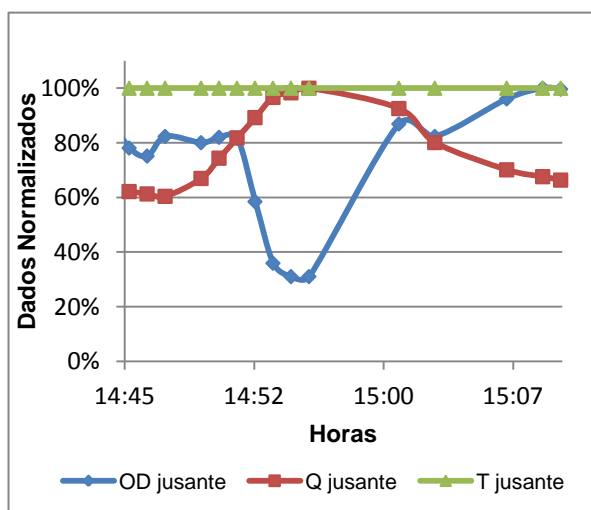


Figura 51 - Parâmetros medidos em função do tempo de medição, a jusante do 2º estágio da elevação inicial, na ETAR de Frielas (2º ensaio de 19/08/2015).

A análise dos gráficos mostra que a concentração de OD, tanto a montante como a jusante do 2º estágio, variou bastante, não existindo qualquer evolução idêntica à do caudal. A temperatura na água residual evoluiu de forma constante, na ordem dos 23,8 °C.

Na 2ª campanha, tal como referido na secção 5.3.4, devido à descarga do efluente da EE3 a jusante da elevação inicial, mediu-se num ponto próximo e afastado da entrada deste efluente, a concentração de OD no ponto mais afastado foi ligeiramente superior à concentração medida junto da descarga do efluente EE3, tal como esperado, pois reduz o nível de OD. Assim, no 1º ensaio, no ponto próximo e no ponto afastado da entrada do efluente EE3, a concentração, em média, foi 1,53 mg/L e 2,53 mg/L, respetivamente. No 2º ensaio, em média, a concentração foi 2,01 mg/L e 2,83 mg/L no ponto próximo e no ponto afastado da descarga do efluente da EE3, respetivamente.

Em suma, em maior parte dos ensaios, os dados associados ao efluente dos parafusos de Arquimedes dos casos de estudos, apresentaram um comportamento estável, sem variações bruscas tal como se observou no afluente, demonstrando que os parafusos de Arquimedes têm alguma capacidade para homogeneizar.

6.3 CONSTRUÇÃO DA FUNÇÃO

A regressão linear múltipla é um método matemático aplicado para descrever a relação entre uma variável dependente, neste caso, a concentração de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes (OD_j) e várias variáveis independentes, caracterizadoras do sistema elevatório e da água residual afluente, nomeadamente:

- a concentração de oxigénio dissolvido a montante dos parafusos de Arquimedes (OD_m);
- o caudal elevado (Q);
- o diâmetro nominal do parafuso de Arquimedes (D);
- o comprimento do parafuso de Arquimedes (L).

Ou seja:

$$OD_j = f(OD_m, Q, D, L)$$

Porém, esta função apenas aplica-se a parafusos de Arquimedes com uma gama de valores de inclinação entre 32°,30 e 38°, e a uma temperatura da água residual que varie entre 20,6 °C e 25,3 °C.

O objetivo do modelo matemático pretendido é usar variáveis que se presume afetar o arejamento colateral dos parafusos de Arquimedes para estimar o nível de aumento de OD durante a elevação da massa de água residual por ação da rotação do parafuso de Arquimedes.

Em termos de caracterização dos dados estatísticos, o número de amostras disponíveis para análise é de 10 a 20, quando possível repetidas de 2 a 3 vezes por dia, em 3 conjuntos diferentes de parafusos de Arquimedes, tal como abordado na secção 4.1.4. Assim, o primeiro passo para

elaboração da função consiste em verificar se os dados recolhidos têm distribuição Normal, devido ao seu tamanho, porque o número de dados da amostra é inferior a 30. Com estas condições, foi necessário recorrer ao teste de D'Agostino Pearson, através do *software* MedCalc (versão 15.8), para testar a sua normalidade. Realizado o teste verificou-se que a maior parte dos dados pertencia a uma distribuição Normal.

Passando à análise de resultados, foi necessário recorrer a três regressões. Isto porque, ao utilizar todos os dados na mesma regressão, o coeficiente de correlação (R^2) torna-se menor. Assim, além da regressão com base em todos os resultados obtidos em ambas as campanhas de ensaios, opta-se também por apresentar as regressões, com os resultados da 1ª e 2ª campanha de medição, o R^2 torna-se maior, isto é, maior será a proporção da variação do OD_j explicada pelas variáveis independentes (OD_m , Q, D, L).

• **Regressão Linear Múltipla**

A expressão obtida para o modelo de regressão linear múltipla, utilizando os dados recolhidos em ambas as campanhas experimentais, com um intervalo de confiança de 95%, foi a seguinte (Equação 6.1):

$$OD_j = -0,568 + 0,209 OD_m - 0,049 Q - 5,417 D + 1,140L \quad (6.1)$$

Em seguida, na Tabela 5, apresenta-se o erro-padrão, o valor da estatística do teste t de *Student* (Stat t) e o nível de significância (valor p) dos coeficientes da regressão.

Tabela 5 - Testes sobre os coeficientes da regressão linear, utilizando os dados de ambas campanhas experimentais.

	Coeficiente	Erro-padrão	Stat t	Valor p
Intercetor	-0,568	0,683	-0,831	0,407
OD_m	0,209	0,045	4,619	0,000
Q	-0,049	0,327	-0,151	0,880
D	-5,417	0,278	-19,489	0,000
L	1,140	0,102	11,158	0,000

Porém, utilizando os dados obtidos em ambas as campanhas de ensaios, pode-se concluir que os coeficientes da interseção e da variável Q são insignificantes a 95% de confiança. As variáveis OD_m , D e L rejeitam a hipótese nula. Por isso, as variáveis concentração de OD a montante, o diâmetro e o comprimento dos parafusos de Arquimedes são úteis na predição da variável dependente (a concentração de OD na água residual após a elevação por meio de parafusos de Arquimedes).

Na tabela seguinte (Tabela 6), apresenta-se a síntese da função desenvolvida para os dados recolhidos em ambas as campanhas de ensaios.

Tabela 6 - Sumário do modelo da regressão linear para estimativa do nível de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes, com os dados de ambas as campanhas experimentais.

Estatística de regressão	
R	0,864
R ²	0,747
R ² ajustado	0,741
Erro - padrão	0,915
Número de amostras	169

Neste caso, o modelo da regressão linear para a estimativa do nível de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes, apresenta um valor de R² de 0,747, o que significa 74,7% da variação total em OD_j é explicada pela regressão (6.1), apresentada anteriormente. Este percentual revela um razoável ajuste do modelo.

Através da Tabela 7, apresenta-se a análise da variância, ANOVA, que obtém o valor do F-estatístico, isto é, permite testar a significância da regressão da estimativa do OD a jusante dos parafusos de Arquimedes.

Tabela 7 - ANOVA da regressão linear, com os dados de ambas as campanhas experimentais.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F-estatístico	Valor-p
Fator (entre as amostras)	406,4	4	101,6	121,2	6,45x10 ⁻⁴⁸
Residual (dentro das amostras)	137,4	164	0,838		
Total	543,9	168			

Por isso, para $\alpha=0,05$, obteve-se um valor F-estatístico = 121,2 com 4 e 164 graus de liberdade, que corresponde a um valor-p 6,45x10⁻⁴⁷. Assim, rejeita-se a hipótese nula com um nível de confiança de 95%. Pode-se, então, afirmar que a regressão (6.1) é significativa e explica a variação na variável resposta, ou seja, a variação do OD_j.

1ª Campanha de Ensaios

A função obtida, de acordo com a informação recolhida na 1ª campanha experimental, para o modelo de regressão linear múltipla, é dada por (Equação 6.2):

$$OD_j = 0,076 - 0,046 OD_m + 0,577 Q - 4,341 D + 0,898 L \quad (6.2)$$

Os resultados do erro-padrão, valor da estatística do teste t de *Student* e o valor-p, para os coeficientes das variáveis e intersecção da regressão, apresentam-se, em seguida, na Tabela 8.

Tabela 8 - Testes sobre os coeficientes da regressão linear, utilizando os dados da 1ª campanha experimental.

	Coeficiente	Erro-padrão	Stat t	Valor-p
Intercetor	0,076	1,054	0,072	0,943
OD _m	-0,046	0,043	-1,065	0,291
Q	0,577	0,548	1,052	0,296
D	-4,341	0,253	-17,183	0,000
L	0,898	0,149	6,021	0,000

Neste caso, além do intercetor da regressão linear, as variáveis OD_m e Q não influenciam significativamente a variável dependente OD_j, com 95% de confiança. Porém, as variáveis diâmetro e comprimento rejeitam a hipótese nula. Assim, apenas o diâmetro e o comprimento dos parafusos de Arquimedes são úteis na predição do valor do OD_j.

Relativamente à qualidade geral da regressão, na Tabela 9 e Tabela 10 apresentam-se os resultados referentes à regressão linear múltipla obtida com os resultados da 1ª campanha experimental.

Tabela 9 - Sumário do modelo da regressão linear para estimativa do nível de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes, com os dados da 1ª campanha experimental.

Estatística de regressão	
R	0,904
R ²	0,817
R ² ajustado	0,807
Erro - padrão	0,606
Número de amostras	78

Ao observar a Tabela 9, constata-se que o valor de R^2 é razoável, uma vez que 81,7% da concentração de OD após os parafusos de Arquimedes é explicada pela variação da concentração de OD a montante dos parafusos, caudal, diâmetro do parafuso e comprimento do parafuso. Pode-se concluir que o modelo de regressão possui um moderado ajustamento aos dados.

Tabela 10 - ANOVA da regressão linear, com os dados da 1ª campanha experimental.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F-estatístico	Valor-p
Fator (entre as amostras)	119,2	4	29,8	81,3	4,00x10 ⁻²⁶
Residual (dentro das amostras)	26,8	73	0,367		
Total	146,0	77			

Conforme se pode observar na Tabela 10, obteve-se um valor F-estatístico = 81,3 com 4 e 73 graus de liberdade, que corresponde a um valor-p 4,00x10⁻²⁶. Deste modo, ao nível de significância de 0,05, rejeita-se a hipótese nula. Ou seja, o que se pode concluir é que esta regressão (6.2) é significativa e consegue explicar a variação do OD_j, a variável dependente.

2ª Campanha de Ensaios

A expressão obtida, segundo os dados recolhidos na 2ª campanha de ensaios, para o modelo da regressão linear múltipla, é dada por (Equação 6.3):

$$OD_j = 0,987 - 0,140 OD_m - 0,061 Q - 7,898 D + 1,438 L \quad (6.3)$$

Na tabela 11, encontra-se o erro-padrão, o valor do teste t de *Student* e o valor-p, associados a cada variável e intersecção da regressão em questão.

Tabela 11 - Testes sobre os coeficientes da regressão linear, utilizando os dados da 2ª campanha experimental.

	Coeficiente	Erro-padrão	Stat t	Valor-p
Intercetor	0,987	0,509	1,939	0,056
OD _m	-0,140	0,073	-1,924	0,058
Q	-0,061	0,228	-0,268	0,789
D	-7,898	0,408	-19,346	0,000
L	1,438	0,095	15,119	0,000

No entanto, verifica-se que as variáveis explicativas D e L são revelantes na predição do valor do OD_j, uma vez que o valor-p é igual a zero (valor-p < 0,05), ou seja, rejeitam hipótese nula. Por outro lado, o valor p associado à variável Q é elevado, bem como o valor-p da intersecção e OD_m excedem ligeiramente 0,05, pelo que rejeitam a hipótese nula. Assim, a intersecção e as variáveis OD_m e Q não influenciam significativamente a variável dependente OD_j, com 95% de confiança.

No que respeita à qualidade geral da regressão, na Tabela 12 e na Tabela 13 são apresentados os resultados alusivos à regressão linear múltipla obtida através dos resultados da 2ª campanha de ensaios.

Tabela 12 - Sumário do modelo da regressão linear para estimativa do nível de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes, com os dados da 2ª campanha experimental.

Estatística de regressão	
R	0,958
R ²	0,919
R ² ajustado	0,915
Erro - padrão	0,574
Número de amostras	91

Observando a Tabela 12, na 2ª campanha experimental, repara-se que o valor R² é alto, dado que 91,9% o OD_j é explicado pela variação do OD_m, Q, D e L. Contudo, neste caso, pode-se concluir que o modelo da regressão linear tem um bom ajustamento dos dados.

Tabela 13 - ANOVA da regressão linear, com os dados da 2ª campanha experimental.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F-estatístico	Valor-p
Fator (entre as amostras)	319,7	4	79,9	242,4	6,01x10 ⁻⁴⁶
Residual (dentro das amostras)	28,4	86	0,330		
Total	348,0	90			

Relativamente ao teste ANOVA (Tabela 13), o valor do F-estatístico é igual a 242,2 com 4 e 86 graus de liberdade, que corresponde a um valor-p 6,01x10⁻⁴⁶. Logo, ao nível de significância de 0,05, rejeita-se a hipótese nula. Deste modo, pode-se afirmar que a regressão (6.3) é significativa e explica a variação do OD_j (variável resposta).

- **Regressão Não Linear**

A linearização consiste em transformar o modelo não linear num modelo linear, pela simples inversão dos termos. Neste caso, o modelo não linear é uma função exponencial, onde a base são as variáveis independentes (OD_m , Q , D , L) e os respetivos expoentes são os valores dos coeficientes, β_i . Torna-se num modelo linear após a aplicação de logaritmos (de base 10). A razão principal por optar pelos logaritmos, com base nos resultados obtidos, é que o OD_j não excede o valor 8,16 mg/L, caso excedesse a água residual estaria sobressaturada.

Uma vez linearizado o modelo não linear, então aplica-se o modelo da regressão linear múltipla, consequentemente efetua-se a análise da qualidade da mesma.

Assim sendo, para um intervalo de confiança de 95%, a função obtida para o modelo não linear utilizando os dados recolhidos em ambas as campanhas de ensaios, foi a seguinte (Equação 6.4):

$$\log OD_j = 0,098 \log OD_m - 0,001 \log Q - 0,567 \log D + 0,596 \log L \quad (6.4)$$

A equação (6.4) transformada numa função exponencial é descrita pela Equação (6.5):

$$OD_j = OD_m^{0,098} \times Q^{-0,001} \times D^{-0,567} \times L^{0,596} \quad (6.5)$$

Seguidamente, na Tabela 14 apresenta-se a informação da significância das variáveis incluídas na Equação (6.8).

Tabela 14 - Testes sobre os coeficientes da regressão linearizada, utilizando os dados de ambas campanhas experimentais.

	Coeficiente	Erro-padrão	Stat t	Valor-p
Log OD_m	0,098	0,029	3,312	0,001
Log Q	-0,001	0,031	-0,027	0,978
Log D	-0,567	0,159	-3,560	0,000
Log L	0,596	0,044	13,438	0,000

Neste caso, apenas o coeficiente da variável caudal manifestou ser insignificante a 95% de confiança. Isto porque, o valor-p da variável Q é próximo de 1, por isso não rejeita a hipótese nula.

Em seguida, na Tabela 15 e Tabela 16 apresenta-se a síntese e o teste ANOVA da regressão linearizada obtida com os resultados de ambas as campanhas de ensaios.

Tabela 15 - Sumário do modelo da regressão linearizada para estimativa do logaritmo do nível de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes, com os dados de ambas as campanhas experimentais.

Estatística de regressão	
R	0,957
R ²	0,915
R ² ajustado	0,908
Erro - padrão	0,174
Número de amostras	169

Após analisar a Tabela 15, o valor de R² é alto, isto é, 91,5% do logaritmo da concentração de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes é explicado pela variação dos logaritmos da concentração de OD a montante dos parafusos, caudal de água residual elevada, diâmetro do parafuso e comprimento do parafuso.

Tabela 16 - ANOVA da regressão linearizada, com os dados de ambas as campanhas experimentais.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F-estatístico	Valor-p
Fator (entre as amostras)	54,3	4	13,6	446,3	5,37x10 ⁻⁸⁷
Residual (dentro das amostras)	5,0	165	0,03		
Total	59,4	169			

A regressão (6.4) possui um bom ajustamento dos dados. Mas, também, pode-se afirmar que é significativa e explica a variação na forma logarítmica da variável resposta (a concentração de OD na água residual a jusante do sistema de elevação por parafusos de Arquimedes). Isto porque, conforme apresentado na Tabela 16, o valor do F-estatístico é igual a 446,3 com 4 e 165 graus de liberdade, que corresponde a um valor-p igual a 5,37 x10⁻⁸⁷. Logo, ao nível de significância de 0,05, rejeita-se a hipótese nula.

1ª Campanha de Ensaios

A regressão obtida para o modelo linearizado, usando logaritmos, com base nos dados recolhidos na 1ª campanha experimental, foi a seguinte (Equação 6.6):

$$\log OD_j = -0,068 \log OD_m - 0,045 \log Q - 0,220 \log D + 0,477 \log L \quad (6.6)$$

A equação (6.6) convertida em regressão não linear, é dada por (Equação 6.7):

$$OD_j = OD_m^{-0,068} \times Q^{-0,045} \times D^{-0,220} \times L^{0,477} \quad (6.7)$$

Relativamente à significância dos coeficientes, na Tabela 17, apresenta-se o erro-padrão, o valor do teste t de *Student* e o valor-p.

Tabela 17 - Testes sobre os coeficientes da regressão linearizada, utilizando os dados da 1ª campanha experimental.

	Coeficiente	Erro-padrão	Stat t	Valor-p
Log OD _m	-0,068	0,038	-1,794	0,077
Log Q	-0,045	0,039	-1,135	0,260
Log D	-0,220	0,209	-1,054	0,295
Log L	0,477	0,054	8,845	0,000

Como se pode ver pela Tabela 17, o valor-p das variáveis dos logaritmos de OD_m, Q e D excedem o valor de $\alpha = 0,05$, ou seja, são insignificantes. Logo, apenas o logaritmo de L é útil para estimar o valor do logaritmo de OD_j, visto que rejeita a hipótese nula.

Em seguida, na Tabela 18 e na Tabela 19 apresentam-se os resultados alusivos à regressão (6.6) obtida com os dados recolhidos na 1ª campanha de ensaios.

Tabela 18 - Sumário do modelo da regressão linearizada para estimativa do logaritmo do nível de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes, com os dados da 1ª campanha experimental.

Estatística de regressão	
R	0,959
R ²	0,920
R ² ajustado	0,904
Erro - padrão	0,153
Número de amostras	78

O modelo possui um bom ajustamento aos dados. Dado que, R² é igual a 0,920, ou seja, 92,0 % do logaritmo de OD_j é explicado pela variação dos logaritmos de OD_m, Q, D e L.

Tabela 19 - ANOVA da regressão linearizada, com os dados da 1ª campanha experimental.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F-estatístico	Valor-p
Fator (entre as amostras)	20,0	4	5,0	213,7	$1,74 \times 10^{-39}$
Residual (dentro das amostras)	1,7	74	0,02		
Total	21,7	78			

Portanto, através do teste ANOVA, obteve-se um F-estatístico igual a 213,7 com 4 e 74 graus de liberdade, que corresponde a um valor-p igual a $1,74 \times 10^{-39}$. Logo, rejeita a hipótese nula com 95% de confiança. Assim sendo, a regressão (6.6) é significativa e explica a variação na variável resposta, isto é, o logaritmo de OD_j.

2ª Campanha de Ensaios

O modelo linearizado, de acordo com os dados recolhidos na 2ª campanha de ensaios, com um intervalo de confiança de 95%, é dado pela Equação (6.8):

$$\log OD_j = 0,449 \log OD_m + 0,118 \log Q - 0,783 \log D + 0,757 \log L \quad (6.8)$$

Manipulando a expressão (6.8), obtêm-se expoentes, ou seja, pode ser escrita da seguinte forma (Equação 6.9):

$$OD_j = OD_m^{0,449} \times Q^{0,118} \times D^{-0,783} \times L^{0,757} \quad (6.9)$$

Na Tabela 20 encontra-se um quadro com a informação da significância das variáveis incluídas na Equação (6.8).

Tabela 20 - Testes sobre os coeficientes da regressão linearizada, utilizando os dados da 2ª campanha experimental.

	Coeficiente	Erro-padrão	Stat t	Valor-p
Log OD _m	0,449	0,046	9,740	0,000
Log Q	0,118	0,031	3,796	0,000
Log D	-0,783	0,166	-4,702	0,000
Log L	0,757	0,047	16,114	0,000

No caso dos resultados da 2ª campanha experimental, todas os coeficientes das variáveis incluídas no modelo linearizado, influenciam significativamente a variável dependente, o logaritmo de OD_j.

De seguida, os resultados alusivos à regressão linearizada, obtida com os dados recolhidos na 2ª campanha experimental, encontram-se na Tabela 21 e na Tabela 22.

Tabela 21 - Sumário do modelo da regressão linearizada para estimativa do logaritmo do nível de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes, com os dados da 2ª campanha experimental.

Estatística de regressão	
R	0,982
R ²	0,964
R ² ajustado	0,951
Erro - padrão	0,125
Número de amostras	91

Ao observar a Tabela 21, consta-se que o valor R² é muito alto, dado que 96,4% do logaritmo da concentração de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes é explicada pela variação na forma logarítmica das variáveis OD_m, Q, D e L. Este percentual revela um excelente ajuste do modelo.

Tabela 22 - ANOVA da regressão linearizada, com os dados da 2ª campanha experimental.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F-estatístico	Valor-p
Fator (entre as amostras)	36,3	4	9,1	578,0	3,00x10 ⁻⁶¹
Residual (dentro das amostras)	1,4	87	0,02		
Total	37,7	91			

Assim, para $\alpha=0,05$, resultou um F-estatístico = 578,0 com 4 e 87 graus de liberdade, que condiz a um valor-p = 3,00x10⁻⁶¹. Por esta razão, rejeita-se a hipótese nula com 95% de confiança. Assim, pode-se afirmar que a regressão (6.8) é significativa e explica a variação do logaritmo de OD_j.

A conclusão relativa a estas regressões, tanto o modelo de regressão linear como o modelo não linear (exponencial), prende-se pelo fato das regressões (Expressões 6.3 e 6.8), resultantes dos dados da 2ª campanha experimental, apresentarem um melhor ajustamento dos dados, relativamente às regressões (Expressões 6.1, 6.2, 6.4 e 6.6), resultantes dos dados de ambas as campanhas e da 1ª campanha experimental. Assim como, o parâmetro de caudal, em todas as regressões, não afetar significativamente o nível de OD após o sistema de elevação de águas residuais por parafusos de Arquimedes.

6.3.1 VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Para cada campanha experimental, os valores de OD_j resultantes dos modelos, bem como os valores adquiridos por medição, são expostos graficamente na Figura 52 e Figura 53. Assim, permitirá uma apreciação da discrepância entre os valores resultantes dos modelos e os valores medidos.

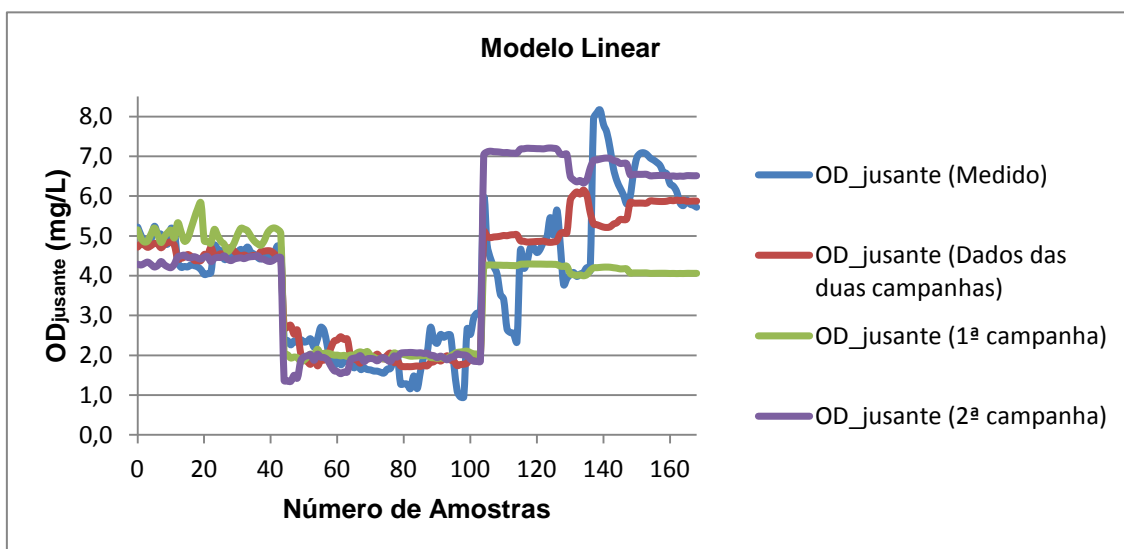


Figura 52 - Valores de OD_j resultantes do modelo da regressão linear e por medição.

Observando a Figura 52, pode-se verificar que os valores de OD_j obtidos pelo modelo da regressão linear são relativamente próximos do valor medido, exceto a partir da 106ª amostra.

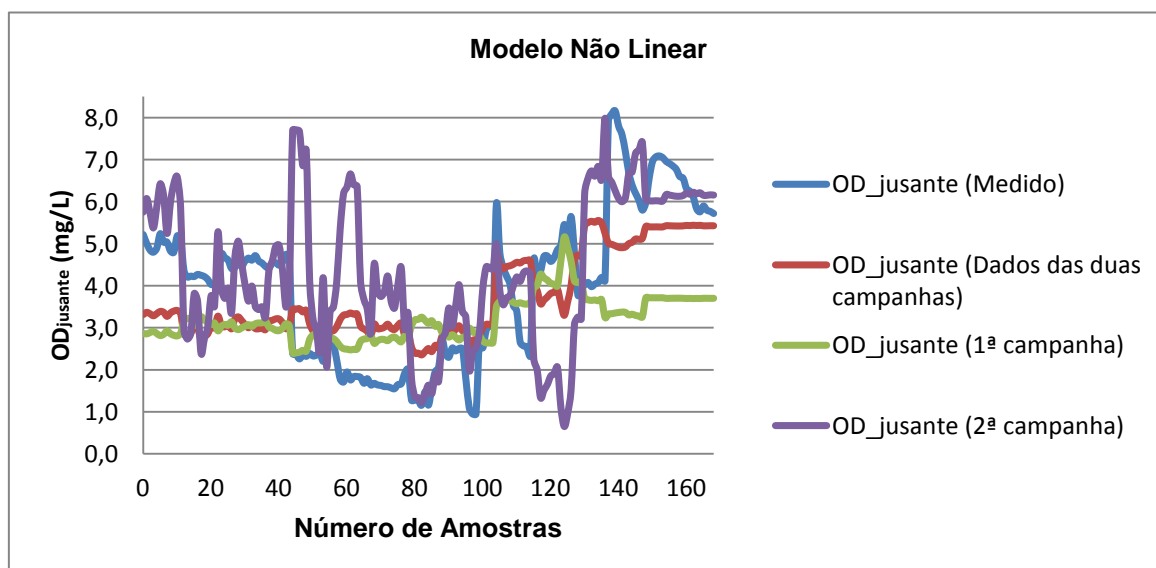


Figura 53 - Valores de OD_j resultantes do modelo da regressão não linear (função exponencial) e por medição.

Relativamente ao modelo não linear, através da Figura 53, pode-se verificar um ligeiro afastamento entre os valores de OD_j resultantes do modelo não linear e o valor medido. Mas, por outro lado, as regressões do modelo não linear obtiveram melhores ajustamentos dos dados em comparação com as regressões do modelo linear.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 CONCLUSÕES FINAIS

O que se pretendia estudar nesta dissertação, era a capacidade de arejamento de água residual em sistemas de elevação por parafusos de Arquimedes, instalados em estações de tratamento. O objetivo fulcral do trabalho foi avaliar o potencial do arejamento e elaborar uma função recorrendo a métodos estatísticos, para estimar o nível de oxigénio, resultante da oxigenação da água residual, promovida pelo movimento do parafuso em causa.

O estudo abrangeu a medição de parâmetros, tais como o teor de oxigénio dissolvido, temperatura da água residual e caudal, em dois pontos específicos das ETAR de Alcântara, Frielas e Bucelas. Esta medição foi feita a montante e jusante dos parafusos de Arquimedes, que se encontravam instalados na elevação inicial de águas residuais. Estes parafusos possuem características distintas, em termos de dimensões.

Constatou-se, em primeira instância, que os parafusos de Arquimedes contribuem significativamente para o aumento da concentração de oxigénio dissolvido na água residual, de montante para jusante, em consequência da turbulência, provocada pelo movimento rotativo e da própria geometria do parafuso, formando bolhas de ar. Isto gera, então, a incorporação de oxigénio, presente na atmosfera gasosa circundante, no escoamento. Pelo que, pode-se considerar que o parafuso de Arquimedes, aplicado no saneamento, além da função de bombear a massa líquida, possui a função adicional de oxigenar da água residual.

Ao longo da análise dos dados obtidos, averiguou-se que, em grande parte, o nível de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes, quando comparado com o OD a montante, estava estável mesmo que o caudal sofresse alterações. Daqui se conclui que os parafusos em estudo demonstraram alguma capacidade residual de promover a homogeneização das características da água residual.

Em resumo, na Tabela 23, apresentam-se os valores médios a respeito da concentração de OD, a jusante do conjunto de parafusos, bem como a eficiência de rearejamento dos mesmos.

Tabela 23 -Valores médios da concentração de OD a jusante dos parafusos de Arquimedes e da eficiência de rearejamento, à temperatura de 20°C.

Casos de Estudo	Dimensões		OD a jusante da elevação (mg/L)		E20	
	D (m)	L (m)	1ª campanha	2ª campanha	1ª campanha	2ª campanha
ETAR de Alcântara	2,5	16,3	5,00	4,44	0,77	0,82
ETAR de Frielas	1,65	9,843	1,99	1,98	0,14	0,21
ETAR de Bucelas	0,55	7,35	4,22	6,65	0,69	0,52

Pela análise da Tabela 23, constata-se que, os parafusos de Arquimedes de maior e de menor dimensão, originam um maior valor de OD no líquido transportado.

Verificou-se, que em alguns resultados, o nível de OD foi aproximadamente igual e, em alguma situações, bastante superior, a resultados obtidos em parafusos de maiores dimensões e cobertos. Tal acontece pois, apesar de terem dimensões pequenas, os parafusos estão instalados a céu aberto. Contudo, estar coberto ou estar disposto diretamente ao ar atmosférico são condições diferentes provocam diferenças nos resultados, porque, estando ao ar livre, se aceleram as trocas entre o oxigénio do ar (21% de O₂) e a água residual.

Por outro lado, e em particular na ETAR de Frielas, os parafusos do 2º estágio de elevação inicial, de dimensões intermédia e cobertos, revelaram ser menos eficientes em aumentar o OD na água residual (Tabela 23). Assim, a concentração de oxigénio no efluente dos parafusos foi relativamente menor. Isto porque, imediatamente a jusante da elevação inicial, nesta ETAR, existe a entrada de um efluente, proporcionando uma redução do OD, nesta zona.

Como resultado principal do trabalho, as funções que estimam a concentração de oxigénio dissolvido na água residual, que resulta do arejamento colateral dos parafusos de Arquimedes, são as seguintes:

Modelo Linear

Dados de ambas as campanhas
experimentais

$$OD_j = -0,568 + 0,209 OD_m - 5,417 D + 1,140 L \quad R^2 = 0,747$$

Dados da 1ª campanha experimental

$$OD_j = 0,076 - 0,046 OD_m - 4,341 D + 0,898 L \quad R^2 = 0,817$$

Dados da 2ª campanha experimental

$$OD_j = 0,987 - 0,140 OD_m - 7,898 D + 1,438 L \quad R^2 = 0,919$$

Modelo não linear (função exponencial)

Dados de ambas as campanhas experimentais	$OD_j = OD_m^{0,098} \times D^{-0,567} \times L^{0,596}$	$R^2 = 0,915$
Dados da 1ª campanha experimental	$OD_j = OD_m^{-0,068} \times D^{-0,220} \times L^{0,477}$	$R^2 = 0,920$
Dados da 2ª campanha experimental	$OD_j = OD_m^{0,449} \times D^{-0,783} \times L^{0,757}$	$R^2 = 0,964$

Embora tenha sido previsto desenvolver uma única expressão, o que continua a ser objetivo de posterior investigação, apresentam-se três regressões com 95% de confiança, utilizando todos os resultados obtidos em ambas as campanhas de ensaios, assim como os resultados individuais obtidos na 1ª e 2ª campanha de ensaios experimentais. Uma vez que, o valor do quadrado do coeficiente de correlação (R^2), utilizando todos os resultados, é mais baixo, as outras funções são mais rigorosas se conseguirem definir condições semelhantes na estimativa. O objetivo da aplicação prática destas ferramentas é atingir uma formulação simples, portanto isenta de condicionalismos, pelo que uma extensão da amostragem permitirá refinar as equações, que já se mostram tão promissoras como ferramenta de apoio.

Após a análise da qualidade de todas as regressões obtidas, verificou-se que a variável caudal, não afeta, significativamente, o nível de OD no efluente aos parafusos de Arquimedes. Porém, as características geométricas dos parafusos, ou seja, o diâmetro e o comprimento, alteraram significativamente o valor da concentração de oxigénio na água residual bombeada, situação que deverá ser confirmada com a adição de nova tipologia de dados.

Em suma, os parafusos de Arquimedes quando instalados na elevação inicial de água residual, numa ETAR, além da função principal, de bombear o líquido, promovem um pré-arejamento significativo. Esta função adicional do parafuso de Arquimedes, caso não tenha descarga de afluentes a jusante, como foi o caso da ETAR de Frielas, poderá melhorar o desempenho global do processo de tratamento. Também se pode verificar neste estudo, que estes têm um elevado potencial adicional de reoxigenar a água residual em sistemas de transporte em que é necessário evitar a septicidade e em que as alturas de elevação e os caudais a elevar são favoráveis à utilização desta tecnologia. As expressões obtidas podem ser úteis, ou seja, podem servir de apoio, em investigação na área específica da elevação de águas residuais e em conceção e exploração de estações depuradoras.

7.2 LIMITAÇÕES GERAIS DO ESTUDO

Tal como já foi referido no capítulo da metodologia (capítulo 4), as medições foram efetuadas a montante e a jusante do sistema elevatório. Estas medições não foram realizadas em simultâneo, devido ao facto de existir apenas uma sonda portátil de medição de OD. Pelo que, não permite obter uma estimativa do acréscimo de OD instantâneo.

Entre os três casos de estudo, os parafusos do 2º estágio de elevação inicial da ETAR de Frielas são os que apresentam dimensões intermédias, e neles não foi perceptível o nível de oxigenação de água residual, mencionado no capítulo dos casos de estudo (capítulo 3). Consequentemente, os dados obtidos, induziram em prejuízo de um consequente menor ajustamento dos modelos obtidos. Para a correta determinação de regressões, dever-se-ia ter optado por uma estação de elevação, com parafusos de dimensão intermédia, sem uma descarga de afluentes brutos, imediatamente a seguir ao bombeamento. Existe intenção de prosseguir a investigação de forma a afinar estes aspetos.

7.3 PERSPETIVAS FUTURAS

Seria interessante, no futuro, estudar o efeito da reoxigenação da água residual bruta, proporcionado pelos parafusos de Arquimedes, no processo de tratamento, nomeadamente, no reator biológico, particularmente em recirculação de lamas cujas alturas de elevação são normalmente inferiores a 5,00 m. Tal investigação, passaria por realizar uma análise comparativa dos gastos energéticos no arejamento mecânico e/ou arejamento por difusores, instalados no reator biológico de biomassa suspensa. Esta experiência deveria ser realizada entre duas ETAR, uma com e outra sem parafusos de Arquimedes instalados a montante do tratamento. O maior custo de investimento dos parafusos de Arquimedes contrabalançado com a sua maior longevidade e robustez deverá ser também considerado comparativamente, incluindo uma análise de ciclo de vida que considere as componentes ambientais.

Numa perspetiva futura de continuação da investigação, será igualmente interessante, estimar o eventual aproveitamento do potencial detetado no sistema de arejamento dos leitos percoladores (reatores de biomassa fixa). É certo que o arejamento é natural, mas talvez seja possível reduzir o volume de percolação ou aumentar a altura das tores se o líquido recirculado for sujeito a uma saturação.

A concentração de OD na água residual bombeada por parafusos de Arquimedes, depende da qualidade do afluente ao sistema de elevação. Assim, sugere-se analisar a capacidade do parafuso de Arquimedes, na redução de matéria orgânica. Aqui deverá ser abrangida a medição de parâmetros da qualidade água residual, a montante e a jusante dos parafusos de Arquimedes. Esses parâmetros são: oxigénio dissolvido, carência bioquímica de oxigénio (CBO), carência química de oxigénio (CQO) e sólidos suspensos totais (SST).

Igualmente interessante e promissor será relacionar a potência do motor elétrico dos parafusos de Arquimedes com quantidade de oxigénio acrescida à água residual bombeada.

Considera-se igualmente importante no âmbito do rearejamento, proporcionado pelos parafusos de Arquimedes, definir dois cenários de simulação: cenário de Inverno e cenário de Verão. Estes cenários distintos, permitirão avaliar o efeito da variação da temperatura sobre o rearejamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbood, D.W. e Abood, H. H. (2014). *The Effect of Hydraulic Structure on Aeration Performance Case Study: Stepped Cascade with End Sill*. Civil and Environmental Research. vol. 6, nº 8, pp 11 - 18.
- ANDRITZ (2014). *ANDRITZ Atro: Screw Pumps*. Germany: ANDRITZ Atro GmbH. Disponível em www.andritz.com/no-index/oi-pumps-archimedean-screw-pumps.htm
- Bagatur, T. (2009). *Evaluation of Preaeration with V-Notch Weir and Cascade Structures in Clarifiers*. Journal of Environmental Engineering. pp 176 - 184.
- Bailey, J. E. and Ollis, D. F. (1986). *Biochemical Engineering Fundamentals* (2th edition). New York: McGraw-Hill Education.
- Baylar, A. e Bağatur, T. (2000). *Study of Aeration Efficiency at Weirs*. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences. vol. 24. pp 255-264.
- Baylar, A.; Emiroglu, M. E.; e Bagatur, T. (2006). *An experimental investigation of aeration performance in stepped spillways*. Water and Environment Journal. vol. 20, pp 35 - 42. Disponível em www.researchgate.net/publication/227739021
- Baylar, A.; Hanbay, D.; e Ozpolat, E. (2007). *Modeling Aeration Efficiency of Stepped Cascades by Using ANFIS*. CLEAN - Soil, Air, Water. vol. 35, nº2, pp 186 - 192. Disponível em www.researchgate.net/publication/227780747
- Baylar, A.; Hanbay, D.; e Ozpolat, E. (2008). *An expert system for predicting aeration performance of weirs by using ANFIS*. Expert Systems with Applications. vol. 35, pp 1214 - 1222.
- Butts, T. A.; Shackleford, D. B.; e Bergerhouse, T. R. (1999). *Evaluation of Reaeration Efficiencies of Sidestream Elevated Pool Aeration (SEPA) Stations*. Champaign, Illinois: Illinois Department of Natural Resources.
- Chisti, M. Y. (1989). *Airlift Bioreactors*. London: Elsevier. Chapter 2, pp 12-21.
- Decreto Regulamentar n.º 23/95, de 23 de Agosto. Aprova o Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Destruição de Águas e de Drenagem de Águas Residuais.
- Doran, P. M. (1995). *Bioprocess Engineering Principles*. London: Academic Press. Chapter. 9, pp 190- 201.
- Emiroglu, M. E. e Baylar, A. (2003). *An Investigation of Effect of Stepped Chutes with End Sill on Aeration Performance*. Water Quality Research Journal of Canada. vol. 38, nº 3, pp 527 - 539. Disponível em www.cawq.ca/journal/temp/article/77.pdf

- Emiroglu, M. E. e Baylar, A. (2006). *Self-Aeration in Smooth and Stepped Chutes*. *International Journal of Science & Technology*. vol. 1, nº 2, pp 105 - 113. Disponível em www.researchgate.net/publication/237667901_Self-Aeration_in_Smooth_and_Stepped_Chutes
- Fernandes, M. C. M. (2008). *Modelação Hidráulica da Exploração de um Sistema Elevatório de Águas Residuais*. Relatório de Projeto para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Fonseca, M. M. e Teixeira, J. A. (2007). *Reactores Biológicos: Fundamentos e Aplicações*. Lisboa: Lidel Edições Técnicas.
- Kahil, M. e Seif, H. (2014). *Mathematical Modeling of Wastewater Aeration Efficiency using Natural Stepped Cascades*. *Civil and Environmental Research*. vol. 6, nº 5, pp 41 - 47.
- Kahil, M. e Seif, H. (2014). *Natural Wastewater Treatment in Mountain Areas in Lebanon*. *European Scientific Journal*. vol. 10, nº 14, pp 122 - 135. Disponível em www.eujournal.org/index.php/esj/article/view/3397/3161
- Kappe, S. E. and Neighbor, J. B. (1951). *Pre-Aeration and Aerated Grit Chambers*. *Sewage and Industrial Wastes: The Journal of the Federation of Sewage Works Associations*. vol. 23, nº 7, pp 833-838. Disponível em www.jstor.org/stable/25031628
- Khalifa, A.; Bayoumi, S.; e Monayeri, O. (2011). *Mathematical modeling of aeration efficiency and dissolved oxygen provided by stepped cascade aeration*. *Water Science & Technology*. vol. 63, nº 1, pp 1 - 9.
- Khdhiri, H.; Potier, O.; e Leclerc, J. P. (2014). *Aeration efficiency over stepped cascades: Better predictions from flow regimes*. *Water Research*. vol. 55, pp 194-202. Disponível em [hwww.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135414001389](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135414001389)
- Lakeside Equipment Corporation (2004). *Lakeside Screw Pumps*. USA, Bartlett, IL. Disponível em http://www.lakeside-equipment.com/products/screw_pumps/screw_pumps.aspx
- Landustrie Sneek BV (2012). *Landy Screw Pumps & Hydropower Screws*. The Netherlands. Disponível em www.landustrie.nl/en/downloads.html
- Manyuchi, M. M. (2010). *Measurement And Behavior of the Overall Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Aerated Agitated Alkane Based Multiphase Systems*. Master's thesis. Stellenbosch: Department of Process Engineering at the University of Stellenbosch. pp 4 - 9.
- Matos, J. M. S. (1991). *Aerobiose e Septicidade em Sistemas de Drenagem de Águas Residuais*. Dissertação de Doutoramento. Lisboa: Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.
- Metcalf & Eddy (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th edition, vol. 1). New York: McGraw-Hill Education.

Monayeri, O.; Bayoumi, S.; e Khalifa, A. (2006). *Enhancement of Self-Purification of Streams Using Stepped Aeration*. Alexandria, Egypt: Tenth International Water Technology Conference. Disponível em www.iwtc.info/2006_pdf/04-4.pdf

Motta, A. C. S. (1982). *Estações Elevatórias de Esgotos*. Revista DAE. edição nº 73, pp 48-118. Disponível em www.revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_73_n_795.pdf

Moulick, S.; Tambada, N. V.; Singh, B. K.; e Mal, B. C. (2010). *Aeration characteristics of a rectangular stepped cascade system*. Water Science & Technology. vol. 61, n.º 2, pp 415 - 420.

Moura, I. N. S. C. (2012). *Opções de Tratamento de Águas Residuais por Sistemas Clássicos de Lamas Activadas numa Perspectiva de Minimização de Recursos Aplicados*. Dissertação de Mestrado. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia de Universidade Nova de Lisboa. pp 7.

Mueller, J. A.; Boyle, W. C.; and Pöpel, H. J. (2002). *Aeration: Principles and Practice* (vol. 11). New York: CRC Press.

Pereira, A. F. C. (2012). *Estudo de Transferência de Massa em Sistemas Multifásicos numa coluna Air-Lift*. Dissertação de Mestrado. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. pp 1 - 4.

Ribeiro, J. T. G. (2014). *Sistemas Elevatórios de Águas Residuais em Edifícios*. Dissertação de Mestrado. Lisboa: Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. pp 4 - 10.

Rodrigues, J. U.; Júnior, H. C. R.; Pauli, D. R.; e Cândido, H. B. (2001). *X-002 Proposta de Adequação de Bombeamento de Esgoto Substituindo Bombas Parafuso (Archimedes) por Submersíveis com Vantagens Técnicas, Operacionais e de Manutenção*. Brasil: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Roncuzzi (2009). *Archimedean Water Screw Pumps*. Italy: Roncuzzi®. Disponível em www.roncuzzi.com/products.asp?prod=archimedean_screw_pumps_pa-sp&cl=1

Sabry, T. I.; Hamdy, W.; e AlSaleem, S. S. (2010). *Application of Different Methods of Natural Aeration of Wastewater and their Influence on the Treatment Efficiency of the Biological Filtration*. Journal of American Science. vol. 6, nº 12, pp 944 - 952.

Salgado, R. M. N. (2011). *Arejamento e mistura em reactores biológicos* [projeção visual]. 42 diapositivos: p&b. Comunicação efetuada no âmbito da unidade curricular de Processos e Tratamento Biológicos, ESTSetúbal/IPS.

Santos, P. A. Q. O. (2004). *Reacções de Nitrificação de Compostos Aromáticos: Transferência de Massa e Recção Química*. Dissertação de Doutoramento. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. pp 111-119.

Seidel, H. F. e Baumann, E. R. (1961). *Effect of Preaeration on the Primary Treatment of Sewage*. Journal: Water Pollution Control Federation. vol. 33, nº4, pp 339-355. Disponível em www.jstor.org/stable/25034390

Silva, A. T. (1971). *Estudos de Absorção de Gás-Líquido*. Revista Portuguesa de Química. nº 13, pp 102 - 133. Disponível em <http://www.spq.pt/magazines/RPQ/269/article/642/pdf>

Sousa, E. R. (2001). *Noções de Qualidade da Água*. Lisboa: Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. pp 6.

Spellman, F. R. e Drinan, J. (2001). *Pumping: Fundamentals for the Water and Wastewater Maintenance Operator*. USA: TECHNOMIC. pp 1-5.

www.adlvt.pt (consultado em Julho de 2015)

www.adp.pt (consultado em Maio de 2015)

www.apda.pt (consultado em Maio de 2015)

www.felmag.com/Obras/index.php/ETAR-SERZEDO (consultado em Maio de 2015)

www.simtejo.pt (consultado em Maio de 2015)

www.videos.sapo.pt/penafielTV/playview/4 (consultado em Maio de 2015)

ANEXO I - CAMPANHAS DE MEDIÇÃO DE PARÂMETROS

PLANO DE AMOSTRAGEM

Tabela 24 - Plano das campanhas de ensaios experimentais.

Campanha	Instalação	Data da campanha	Ponto de recolha	Tipo de ensaio	Frequência de ensaios	Duração da medição
1ª Campanha	ETAR de Alcântara	17-04-2015	Montante dos parafusos de Arquimedes	<i>in situ</i>	1 vez por dia	10 minutos
			Jusante dos parafusos de Arquimedes			
	ETAR de Bucelas	02-07-2015	Montante dos parafusos de Arquimedes	<i>in situ</i>	1 vez por dia	10 minutos
			Jusante dos parafusos de Arquimedes			
	ETAR de Frielas	02-07-2015	Montante dos parafusos de Arquimedes	<i>in situ</i>	3 vezes por dia	10 minutos
			Jusante dos parafusos de Arquimedes			
2ª Campanha	ETAR de Alcântara	11-09-2015	Montante dos parafusos de Arquimedes	<i>in situ</i>	2 vezes por dia	1º ensaio :10 minutos
			Jusante dos parafusos de Arquimedes			2º ensaio:20 minutos
	ETAR de Bucelas	19-08-2015	Montante dos parafusos de Arquimedes	<i>in situ</i>	2 vezes por dia	1º ensaio: 10 minutos
			Jusante dos parafusos de Arquimedes			2º ensaio: 20 minutos
	ETAR de Frielas	19-08-2015	Montante dos parafusos de Arquimedes	<i>in situ</i>	2 vezes por dia	1º ensaio:10 minutos
			Jusante dos parafusos de Arquimedes			2º ensaio:15 minutos
					20 minutos	

EXEMPLO DE FICHA DE PREPARAÇÃO DE CAMPANHA EXPERIMENTAL

Informação	
Instalação	ETAR de _____
Data	__/__/____
Parâmetros a recolher	Concentração de Oxigénio Dissolvido, Temperatura e Caudal
Pontos de monitorização	Montante e Jusante dos parafusos de Arquimedes
Horas estimadas para cada recolha	1ª recolha: montante às __h__ e jusante às __h__ 2ª recolha: montante às __h__ e jusante às __h__
Material necessário	Sonda portátil de OD
Observações importantes	A determinação dos parâmetros é feita no local, em que número de dados a recolher, na 1ª recolha são __ e na 2ª recolha são __, em cada ponto de monitorização. Os valores de caudal registados na data e hora da realização das recolhas serão, posteriormente, fornecidos.

EXEMPLO DE FOLHA DE REGISTO DE ENSAIO

Folha de Registo nº __: - Testes aos parafusos de Arquimedes

Designação da ETAR	
Data do ensaio	

Hora	Ponto de Amostragem	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Caudal (m³/h)
	Afluente dos parafusos de Arquimedes			

Hora	Ponto de Amostragem	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Caudal (m ³ /h)
	Efluente dos parafusos de Arquimedes			

Hora	Ponto de Amostragem	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Caudal (m ³ /h)

ANEXO II - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS PARAFUSOS DE ARQUIMEDES DOS CASOS DE ESTUDO

Apresenta-se na Tabela 25 a informação técnica sobre os parafusos de Arquimedes instalados na elevação inicial das ETAR de Alcântara, Frielas e Bucelas. As características técnicas, facultadas pela SIMTEJO, incluem, designadamente, número de unidades, caudal de dimensionamento, altura de elevação, diâmetro do parafuso, diâmetro do veio tubular, comprimento do parafuso, velocidade de rotação do parafuso, ângulo do parafuso, passo do parafuso, potência do motor elétricos, fabricante e marca do parafuso.

Tabela 25 - Características técnicas dos parafusos de Arquimedes instalados em elevação inicial das ETAR de Alcântara, Frielas e Bucelas.

Item	Unidades	Estação de Tratamento		
		ETAR de Alcântara	ETAR de Frielas (2º estágio)	ETAR de Bucelas
Número de unidades	unidade	4 (3+1)	4 (3+1)	2 (1+1)
Caudal de dimensionamento	l/s	2200	534	36
Altura de elevação	mm	7300	4650	3870
Diâmetro do parafuso	mm	2500	1650	550
Diâmetro do veio tubular	mm	1420	-	-
Comprimento do parafuso	mm	16300	9843	7350
Velocidade de rotação do parafuso	rpm	29,8	-	65,4
Ângulo do parafuso	º	32º,30	38º	34º
Passo do parafuso	mm	3000	1650	-
Potência do motor elétrico	kW	225	45	5,5

Item	Unidades	Estação de Tratamento		
		ETAR de Alcântara	ETAR de Frielas (2º estágio)	ETAR de Bucelas
Fabricante e marca do parafuso	Sem grandeza física.	LANDUSTRIE SNEEK BV	-	LANDUSTRIE LANDY- 55/32/735/E3

ANEXO III - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

- 1ª Campanha de Ensaios

Tabela 26 - Resultados experimentais de OD referentes aos parafusos de Arquimedes da elevação inicial da ETAR de Alcântara (17 de Abril).

Ponto de Amostragem	Horas	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Caudal (m³/h)
Afluente dos parafusos de Arquimedes	11:05	1,75	20,6	8559
	11:08	2,06	20,7	7310
	11:09	1,85	20,7	6692
	11:10	1,60	20,9	6777
	11:12	1,88	20,8	7941
	11:14	2,21	20,8	8986
	11:16	2,07	20,8	7885
	11:18	1,53	20,9	6502
	11:21	1,97	20,8	7542
	11:23	2,26	20,8	8268
	11:24	2,36	20,7	8672
	11:26	1,90	20,8	7337
Efluente dos parafusos de Arquimedes	11:33	5,22	20,8	8492
	11:34	5,01	20,9	8404
	11:36	4,85	20,9	6624
	11:37	4,80	20,9	6625
	11:38	4,90	20,9	7120
	11:39	5,24	20,8	7456
	11:40	5,04	20,8	7711
	11:41	5,04	20,9	8195
	11:42	4,83	20,9	8742
	11:43	4,80	20,8	8190
	11:44	5,19	20,8	7468
	11:45	5,13	20,8	6921

Tabela 27 - Resultados experimentais de OD referentes aos parafusos de Arquimedes do 2º estágio de elevação inicial da ETAR de Frielas (02 de Julho).

Ponto de Amostragem	Horas	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Caudal (m³/h)
Aflente dos parafusos de Arquimedes	09:37	4,88	23,4	3300
	09:38	4,97	23,4	3092
	09:40	5,15	23,4	2610
	09:42	4,07	23,1	2453
	09:43	4,56	23,1	2472
	09:45	1,64	22,8	1070
	09:46	0,93	22,8	1073
	09:48	0,70	22,8	1507
	09:49	0,44	22,8	1900
	09:50	1,46	22,8	1888
	09:52	0,28	22,8	2586
Efluente dos parafusos de Arquimedes	10:01	2,39	23,0	2521
	10:02	2,37	23,0	2650
	10:03	2,26	23,1	2778
	10:04	2,36	23,1	2907
	10:05	2,32	23,2	2764
	10:06	2,39	23,2	2620
	10:07	2,33	23,2	2477
	10:08	2,35	23,2	2333
	10:09	2,41	23,3	2190
	10:10	2,20	23,3	2229
	10:11	2,40	23,3	2267
Aflente dos parafusos de Arquimedes	14:37	0,89	22,8	1962
	14:38	0,94	23,7	2127
	14:39	1,33	23,5	2292
	14:42	2,35	23,4	2454
	14:43	3,23	23,4	2508
	14:44	3,39	23,4	2562
	14:45	3,78	23,4	2554
	14:46	3,46	23,4	2546

Ponto de Amostragem	Horas	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Caudal (m³/h)
	14:50	3,47	23,4	2392
	14:53	1,37	23,4	1997
	14:54	1,09	23,4	1866
	14:55	0,91	23,4	1862
Efluente dos parafusos de Arquimedes	15:00	2,70	23,4	2002
	15:01	2,62	23,4	2156
	15:02	2,22	23,4	2310
	15:04	1,78	23,4	2618
	15:05	1,71	23,4	2581
	15:06	1,95	23,4	2544
	15:07	1,76	23,4	2506
	15:09	1,84	23,4	2432
	15:10	1,84	23,4	2438
	15:11	1,82	23,4	2444
	15:12	1,68	23,4	2449
Afluente dos parafusos de Arquimedes	16:54	0,90	23,6	2208
	16:55	0,60	23,6	2262
	16:56	1,63	23,6	2317
	16:59	1,13	23,5	2480
	17:02	1,14	23,5	1848
	17:03	1,26	23,5	1637
	17:05	1,61	23,5	1400
	17:06	1,15	23,5	1375
	17:08	1,05	23,5	1324
	17:09	1,47	23,5	1298
	17:12	1,71	23,5	1609
Efluente dos parafusos de Arquimedes	17:17	1,79	23,3	1927
	17:18	1,64	23,3	1963
	17:19	1,68	23,3	2000
	17:20	1,64	23,4	2081
	17:21	1,63	23,4	2162

Ponto de Amostragem	Horas	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Caudal (m³/h)
	17:22	1,60	23,4	2242
	17:23	1,60	23,4	2323
	17:24	1,57	23,4	2404
	17:25	1,55	23,4	2294
	17:26	1,65	23,4	2185
	17:27	1,67	23,4	2075

Tabela 28 - Resultados experimentais de OD referentes aos parafusos de Arquimedes da elevação inicial da ETAR de Bucelas (02 de Julho).

Ponto de Amostragem	Horas	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Caudal (m³/h)
Afluente dos parafusos de Arquimedes	11:04	1,32	21,8	54
	11:05	0,74	21,8	59
	11:06	0,60	21,8	60
	11:07	0,68	21,8	55
	11:08	0,71	21,8	52
	11:09	0,77	21,8	64
	11:10	0,86	21,8	65
	11:11	0,83	21,8	60
	11:12	0,93	21,8	59
	11:14	0,95	21,8	59
	11:15	0,94	21,8	53
Efluente dos parafusos de Arquimedes	11:25	5,94	22,0	58
	11:28	4,79	22,0	57
	11:30	4,44	22,0	53
	11:31	4,23	22,0	45
	11:34	4,04	21,9	2
	11:37	3,53	21,8	2
	11:38	3,40	21,9	2
	11:43	2,66	21,8	2
	11:44	2,57	21,8	2
	11:45	2,54	21,7	2
	11:46	2,34	21,8	2

Ponto de Amostragem	Horas	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Caudal (m³/h)
Efluente dos parafusos de Arquimedes	15:41	4,62	22,1	57
	15:42	4,19	21,9	50
	15:45	4,34	21,8	53
	15:48	4,70	21,7	65
	15:50	4,71	21,7	56
	15:51	4,58	21,7	61
	15:52	4,67	21,7	55
	15:53	4,86	21,7	56
	15:55	4,97	21,7	57
	16:01	5,46	21,8	54
	16:03	5,02	21,8	51
Afluente dos parafusos de Arquimedes	16:06	0,23	21,8	53
	16:07	0,17	21,0	58
	16:08	0,07	21,0	55
	16:09	0,09	21,8	59
	16:10	0,11	21,8	57
	16:11	0,14	21,8	61
	16:12	0,15	21,8	61
	16:18	0,18	21,8	58
	16:19	0,07	21,8	11
	16:20	0,03	21,8	3
	16:21	0,08	21,9	2
Afluente dos parafusos de Arquimedes	17:50	0,22	22,1	2
	17:51	1,07	22,2	2
	17:52	1,21	22,2	2
	17:53	1,17	22,3	2
	17:57	5,06	23,6	2
	17:58	5,75	23,2	2
	17:59	6,10	23,9	2
	18:00	5,85	23,9	2
	18:01	6,32	24,1	2

Ponto de Amostragem	Horas	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Caudal (m ³ /h)
	18:02	5,71	24,0	2
	18:05	3,64	23,6	61
Efluente dos parafusos de Arquimedes	18:07	5,65	23,2	63
	18:09	4,79	22,8	61
	18:14	3,78	22,2	55
	18:15	3,93	22,1	57
	18:16	4,02	21,9	53
	18:17	4,08	21,9	48
	18:18	3,98	21,8	54
	18:19	4,04	21,8	53
	18:20	4,08	21,7	65
	18:21	4,20	21,7	53
	18:22	4,12	21,6	53

- **2ª Campanha de Ensaios**

Tabela 29 - Resultados experimentais de OD referentes aos parafusos de Arquimedes do 2º estágio de elevação inicial da ETAR de Frietas (19 de Agosto).

Ponto de Amostragem	Horas	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Caudal (m ³ /h)
Afluente dos parafusos de Arquimedes	09:49	0,66	23,3	2115
	09:50	0,87	23,3	1981
	09:51	0,22	23,3	1847
	09:52	0,12	23,3	1712
	09:53	0,12	23,2	1578
	09:54	0,10	23,2	1444
	09:55	0,14	23,2	1479
	09:56	0,19	23,2	1514
	9:57	0,14	23,2	1548
	09:58	0,26	23,2	1583
	09:59	0,21	23,2	1618
Efluente dos parafusos de Arquimedes	10:04	1,92	23,1	2067
	10:05	2,01	23,2	2104

Ponto de Amostragem	Horas	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Caudal (m³/h)
	10:06	1,28	23,2	2142
	10:11	1,28	23,4	2179
	10:13	1,27	23,7	2104
	10:15	1,16	23,5	2033
	10:16	1,48	23,5	2000
	10:17	1,16	23,5	1966
	10:19	1,60	23,5	1900
	10:20	1,96	23,5	1806
	10:21	2,06	23,5	1712
	10:22	2,54	23,4	1619
	10:24	2,72	23,4	1431
	10:25	2,69	23,4	1415
	10:26	2,55	23,4	1400
	10:27	2,67	23,5	1384
	10:29	2,74	23,5	1353
	10:30	2,68	23,5	1607
	10:31	2,66	23,5	1862
	10:32	2,27	23,6	2116
	10:33	2,25	23,6	2371
	10:35	2,39	23,6	2547
Afluente dos parafusos de Arquimedes	14:20	0,60	25,3	1379
	14:21	0,69	24,6	1380
	14:22	1,04	24,4	1381
	14:23	0,77	24,3	1382
	14:24	1,07	24,2	1383
	14:25	1,42	24,2	1485
	14:27	0,93	24,1	1688
	14:30	0,82	24,1	1990
	14:31	0,27	24,1	2087
	14:32	0,41	24,1	2185
	14:33	0,45	24,1	2282

Ponto de Amostragem	Horas	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Caudal (m³/h)
	14:34	0,60	24,1	2380
	14:36	1,20	24,0	2313
	14:38	1,59	24,0	2246
	14:39	1,58	24,0	2212
	14:40	1,59	24,0	2057
Efluente dos parafusos de Arquimedes	14:45	2,70	24,0	1415
	14:46	2,39	24,0	1396
	14:47	2,30	24,0	1376
	14:48	2,52	24,0	1357
	14:50	2,45	24,0	1504
	14:51	2,51	24,0	1670
	14:52	2,50	24,0	1837
	14:53	1,79	24,0	2003
	14:54	1,10	24,0	2170
	14:55	0,95	24,0	2207
	14:56	0,95	24,0	2245
	15:01	2,66	24,0	2078
	15:03	2,52	24,0	1799
	15:07	2,94	24,0	1574
	15:09	3,06	24,0	1518
	15:10	3,05	24,0	1490
	15:11	3,05	24,1	1462
	15:12	2,85	24,0	1434
	15:13	2,93	24,0	1406
	15:14	2,90	24,1	1378
	15:15	2,67	24,1	1535

Tabela 30 - Resultados experimentais de OD referentes aos parafusos de Arquimedes da elevação inicial da ETAR de Bucelas (19 de Agosto).

Ponto de Amostragem	Horas	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Caudal (m ³ /h)
Efluente dos parafusos de Arquimedes	10:58	7,93	23,0	72
	10:59	8,09	23,0	80
	11:00	8,16	23,0	71
	11:01	7,80	23,0	87
	11:02	7,60	23,1	73
	11:03	7,19	23,1	73
	11:05	6,69	23,0	75
	11:06	6,39	23,0	75
	11:07	6,20	23,0	75
	11:08	6,03	22,9	75
	11:09	5,80	22,9	86
Afluente dos parafusos de Arquimedes	11:11	2,28	22,8	73
	11:12	2,16	22,8	74
	11:13	2,01	22,8	74
	11:14	1,87	22,8	76
	11:15	1,83	22,8	74
	11:16	1,90	22,8	73
	11:18	2,23	22,9	86
	11:19	2,39	22,9	69
	11:22	2,79	22,9	66
	11:24	2,76	22,9	75
	11:25	2,87	22,9	80
Afluente dos parafusos de Arquimedes	15:49	4,82	23,7	2,0
	15:51	4,76	23,8	2,0
	15:52	4,75	23,7	2,0
	15:53	4,76	23,8	2,0
	15:54	4,75	23,8	2,0
	15:55	4,75	23,8	2,0
	15:56	5,02	23,8	2,0
	15:57	5,00	23,8	2,0

Ponto de Amostragem	Horas	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Caudal (m³/h)
	15:58	4,97	23,9	2,0
	15:59	4,95	23,9	2,0
	16:00	4,95	23,9	2,0
	16:01	4,98	23,9	2,0
	16:02	5,08	23,9	2,0
	16:03	5,04	23,9	2,0
	16:04	5,12	23,9	2,0
	16:05	5,06	24,0	2,0
	16:06	5,10	24,0	2,0
	16:07	4,99	24,0	2,0
	16:09	4,99	24,0	2,0
	16:10	5,01	24,0	2,0
Efluente dos parafusos de Arquimedes	15:44	5,98	24,1	65
	16:14	6,56	24,2	64
	16:15	6,96	24,2	70
	16:16	7,07	24,2	75
	16:17	7,09	24,2	61
	16:18	7,05	24,2	57
	16:19	6,96	24,2	60
	16:20	6,91	24,1	65
	16:21	6,85	24,1	64
	16:22	6,77	24,0	70
	16:23	6,60	24,0	72
	16:24	6,56	23,9	70
	16:25	6,31	23,8	67
	16:26	6,25	23,8	60
	16:27	6,11	23,7	61
	16:28	5,83	23,6	74
	16:29	5,76	23,5	62
	16:30	5,90	23,5	67
	16:31	5,80	23,4	63

Ponto de Amostragem	Horas	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Caudal (m³/h)
	16:32	5,77	23,4	62
	16:33	5,72	23,4	63

Tabela 31 - Resultados experimentais de OD referentes aos parafusos de Arquimedes da elevação inicial da ETAR de Alcântara (11 de Setembro).

Ponto de Amostragem	Horas	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Caudal (m³/h)
Efluente dos parafusos de Arquimedes	09:18	4,36	23,5	8554
	09:19	4,21	23,6	8941
	09:20	4,23	23,5	9327
	09:21	4,22	23,6	8780
	09:22	4,27	23,6	7923
	09:23	4,25	23,6	6816
	09:24	4,22	23,6	5652
	09:25	4,15	23,6	5134
	09:26	4,03	23,6	4701
	09:27	4,05	23,6	4706
	09:28	4,08	23,6	4774
Afluente dos parafusos de Arquimedes	09:31	0,38	23,5	9282
	09:32	0,34	23,6	7891
	09:33	0,40	23,6	6403
	09:39	0,74	23,7	6890
	09:40	0,63	23,7	8417
	09:41	0,24	23,6	9938
	09:42	0,31	23,7	11444
	09:44	0,38	23,7	12359
	09:46	0,73	23,7	6571
	09:47	0,63	23,7	6427
	09:48	1,56	23,7	6436
Efluente dos parafusos de Arquimedes	14:55	4,76	23,9	9968
	14:57	4,67	24,1	9582
	14:58	4,61	24,1	8522

Ponto de Amostragem	Horas	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Caudal (m³/h)
	14:59	4,41	24,1	7254
	15:00	4,44	24,1	5499
	15:01	4,55	24,1	4437
	15:02	4,47	24,1	4489
	15:04	4,59	24,1	6050
	15:05	4,66	24,1	6709
	15:06	4,61	24,1	6984
	15:08	4,72	24,2	6898
	15:09	4,59	24,2	7301
	15:10	4,54	24,2	8014
	15:13	4,46	24,2	8839
	15:17	4,42	24,2	6565
	15:18	4,54	24,2	5908
	15:19	4,55	24,2	5293
	15:20	4,49	24,2	5423
	15:21	4,56	24,2	5702
	15:22	4,75	24,2	6808
	15:23	4,70	24,2	8007
Afluente dos parafusos de Arquimedes	15:27	0,76	24,1	8336
	15:28	0,68	24,1	7381
	15:29	0,81	24,1	6482
	15:30	0,58	24,1	5955
	15:32	1,28	24,1	5045
	15:33	1,47	24,2	5611
	15:34	1,11	24,1	6315
	15:35	0,81	24,1	7571
	15:36	0,63	24,1	8472
	15:37	0,78	24,1	8394
	15:38	0,59	24,1	8058
	15:39	0,58	24,1	7207
	15:40	0,62	24,1	6503

Ponto de Amostragem	Horas	OD (mg/L)	Temperatura (°C)	Caudal (m ³ /h)
	15:41	0,54	24,1	6037
	15:43	1,04	24,1	5945
	15:44	1,13	24,1	6661
	15:45	1,27	24,1	7933
	15:46	1,26	24,1	8536
	15:47	0,95	24,1	8627
	15:48	0,58	24,1	8293
	15:49	0,75	24,1	7695